

**ESTUDIO Y REVISIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS  
(TERMOGRAFÍA, ULTRASONIDOS Y RESISTÓGRAFO)  
APLICADAS A LA INSPECCIÓN E INTERVENCIÓN DE  
FORJADOS DE MADERA**

**STUDY AND REVISION OF NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES  
(THERMOGRAPHY, ULTRASOUND WAVES AND RESISTOGRAPH)  
FOR THE INSPECTION AND INTERVENTION OF  
WOODEN FLOOR STRUCTURES**

**Doctoranda: M<sup>a</sup> Jesús Morales Conde**

**Directoras: Carmen Rodríguez Liñán, Paloma Rubio de Hita**

**Departamento de Construcciones Arquitectónicas I  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura  
Universidad de Sevilla, 2012**





# **TOMO 1**

## **VOLUME 1**



**INDICE INDEX**

INDICE INDEX .....	III
INDICE DE FIGURAS INDEX OF FIGURES .....	XXI
INDICE DE TABLAS INDEX OF TABLES.....	XXXV

<b>AGRADECIMIENTOS. THANKS.....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN. ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>

<b>CAPÍTULO I. CHAPTER I</b>	
<b>CONSIDERACIONES PREVIAS. PREVIOUS CONSIDERATIONS.....</b>	<b>1</b>

<b>CAPÍTULO II. CHAPTER II</b>	
<b>INTRODUCCIÓN. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>

<b>CAPÍTULO III. CHAPTER III</b>	
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE PARTIDA. OBJECTIVES AND INITIAL HYPOTHESIS.....</b>	<b>9</b>
<b>III.1. OBJETIVOS PRIORITARIOS PRIORITY OBJECTIVES.....</b>	<b>13</b>
<b>III.2. OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS COMPLEMENTARY OBJECTIVES .....</b>	<b>19</b>
<b>III.3. OBJETIVOS PARCIALES PARTIAL OBJECTIVES .....</b>	<b>23</b>

<b>CAPÍTULO IV. CHAPTER IV</b>	
<b>ESTADO DEL CONOCIMIENTO. STATE OF THE ART.....</b>	<b>27</b>
<b>IV.1. MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS DE MADERA.....</b>	<b>29</b>
<b>NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR THE INSPECTION OF TIMBER STRUCTURES</b>	

IV.1.1. INSPECCIÓN VISUAL DE LA MADERA. NORMAS ESPAÑOLA Y EUROPEA. ....	31
VISUAL INSPECTION OF THE WOOD. SPANISH AND EUROPEAN STANDARDS	
IV.1.1.1. Clasificación de la madera nueva para estructuras.....	31
New structural timber grading.	
IV.1.1.2. Evolución de la norma de clasificación visual en España .....	31
Evolution of the visual grading standard in Spain	
IV.1.1.3. Parámetros de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007. Criterios de medición.....	32
Parameters for visual grading according to UNE 56544:2007 Standard. Measurement criteria	
IV.1.1.4. Aplicación de los parámetros de clasificación visual a estructuras existentes .....	39
Visual grading parameters applied to existing structures	
IV.1.2. ENSAYOS DE ULTRASONIDOS EN MADERA.....	41
ULTRASONIC TESTING ON WOOD	
IV.1.2.1. Los ultrasonidos para la detección de estados de deterioro en madera.....	42
Ultrasonids to detect states of wood decay	
IV.1.2.2. Los ultrasonidos para la evaluación resistente de la madera sana.....	46
Ultrasonids to evaluate resistance in the healthy wood	

IV.1.3. LA TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS APLICADA A LA MADERA .....	65
INFRARED THERMOGRAPHY APPLIED TO THE WOOD	
IV.1.3.1. La termografía como técnica de localización de estados tensionales de agotamiento .....	66
Thermography as a technique for locating states of stress depletion	
IV.1.3.2. La termografía como técnica de detección de humedades.....	67
Thermography as a technique to detect moisture content	
IV.1.3.3. La termografía como técnica de control de calidad. ....	70
Thermography as a technique for quality control	
IV.1.3.4. La termografía como técnica de detección de defectos internos. ....	72
Thermography as a technique to detect internal defects	
IV.1.3.5. La termografía como técnica para la detección de termitas. ....	86
Thermography as a technique to detect termites	
IV.1.4. EL RESISTÓGRAFO: LA INSPECCIÓN CUASI NO DESTRUCTIVA DE LOS FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO. ....	89
RESISTOGRAPH: QUASI NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF FLOOR STRUCTURES WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS	
IV.1.4.1. Aplicación del resistógrafo para la estimación de la densidad de la madera.....	90
Resistograph to calculate wood density	
IV.1.4.2. Aplicación del resistógrafo a la evaluación de estructuras en servicio....	95
Resistograph applied to the assessment of structures in service	
IV.1.4.3. La inspección de forjados de entrevigado cuajado. ....	95
Inspection of floor structures with the space filled between beams	

## **IV.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ELEMENTOS DE MADERA: ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....99**

### **DESCRIPTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD ELEMENTS: DESTRUCTIVE TESTING**

IV.2.1. ESCUADRÍAS DE ENSAYO. MADERA LIBRE DE DEFECTOS Y MADERA ESTRUCTURAL.....	101
SIZE SECTION FOR TESTING. DEFECT-FREE AND STRUCTURAL WOOD	
IV.2.1.1. Estudio del "efecto de tamaño" en los parámetros resistentes.....	102
Study of the "size effect" on the resistance parameters	
IV.2.1.2. Coeficientes de relación entre el tamaño de las piezas y la resistencia	103
Correlation coefficients between the size of the pieces and resistance	
IV.2.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO. NORMAS UNE-EN 408, 384, 338, 1912.....	107
TESTING METHODOLOGY. UNE-EN 408, 384, 338, 1912 STANDARDS	
IV.2.2.1. La norma UNE EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas .....	107
UNE EN 408:2011 Standard. Wood structures. Lumber and plywood for structural use. Determination of some physical and mechanical properties	
IV.2.2.2. La norma UNE EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad....	118
UNE EN 384:2010 Standard. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density	
IV.2.2.3. La norma UNE EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes .....	122
UNE EN 338:2010 Standard. Structural timber. Resistance classes	
IV.2.2.4. La norma UNE EN 1912:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales de especies.....	123
UNE EN 1912:2010 Standard. Structural timber. Resistance classes. Assigning visual qualities of the species.	

**IV.3. SOLUCIONES DE CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS FORJADOS DE MADERA: VIGAS Y VIGUETAS ..... 129**  
**SOLUTIONS FOR CONSOLIDATING OR REINFORCING STRUCTURAL ELEMENTS OF THE WOODEN FLOOR STRUCTURES: BEAMS AND JOINTS**

---

IV.3.1. ACTUACIONES SOBRE LOS APOYOS DE LAS VIGAS .....	131
ACTIONS ON THE BEAM SUPPORTS	
IV.3.1.1. Apeo sobre una línea adosada al muro .....	131
Support along a line attached to the wall	
IV.3.1.2. Refuerzo mediante aporte de madera .....	131
Reinforcement by the addition of wood	
IV.3.1.3. Refuerzo del apoyo mediante perfiles metálicos .....	134
Reinforcement of the support by the addition of steel sections	
IV.3.1.4. Refuerzo mediante formulación epoxi .....	135
Reinforcement by epoxy formulation	
IV.3.2. ACTUACIONES SOBRE PIEZAS SOMETIDAS A FLEXIÓN .....	138
ACTIONS ON PIECES SUBJECTED TO BENDING	
IV.3.2.1. Soluciones con aporte de madera .....	138
Solutions by the addition of wood	
IV.3.2.2. Aplicación de la tecnología de las resinas epoxi .....	138
Application of epoxy resin technology	
IV.3.2.3. Soluciones con acero .....	142
Solutions with steel	

**CAPÍTULO V. CHAPTER V**

**PLAN EXPERIMENTAL. EXPERIMENTAL PLAN..... 147**

**V.1. PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS ..... 149**  
**EXPERIMENTAL PLAN FOR INFRARED THERMOGRAPHY TESTING**

---

V.1.1. EQUIPOS UTILIZADOS .....	151
EQUIPMENT USED	
V.1.1.1. Cámara termográfica .....	151
Thermography camera	
V.1.1.2. Equipos auxiliares .....	151
Auxiliar equipment	
V.1.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS .....	152
FACTORS INVOLVED IN INFRARED THERMOGRAPHY TESTS	
V.1.3. ENSAYOS REALIZADOS .....	154
TESTS CONDUCTED	
V.1.3.1. Influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial. ....	154
Influence of wood density on surface temperature	
V.1.3.2. Detección de diferentes contenidos de humedad en la madera .....	155
Detection of different moisture contents in wood	
V.1.3.3. Localización de defectos no superficiales .....	156
Locating non-surface defects	
V.1.3.4. Detección de galerías internas en la madera .....	160
Detection of internal galleries in the wood	

## **V.2. PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL.....163**

### **EXPERIMENTAL PLAN FOR DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTING TO OBTAIN RESISTANCE PARAMETERS AND PHYSICAL PROPERTIES OF SCOTS PINE (*Pinus Sylvestris* L) AND CORSICAN PINE WOOD (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELATION WITH VISUAL GRADING PARAMETERS**

V.2.1. EQUIPOS UTILIZADOS .....	165
EQUIPMENT USED	
V.2.1.1. Geometría de las probetas y medición de defectos .....	165
Geometry of the samples and measurement of defects	
V.2.1.2. Caracterización de las propiedades físicas.....	165
Characterization of physical properties	
V.2.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos .....	165
Measurement of ultrasound velocities	
V.2.1.4. Determinación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad global.....	166
Determination of bending strength and global modulus of elasticity	
V.2.1.5. Equipos auxiliares.....	166
Auxiliar equipment	
V.2.2. MATERIAL DE ENSAYO.....	167
MATERIAL FOR TESTING	
V.2.2.1. Elección del material de ensayo .....	167
Choice of the material for testing	
V.2.2.2. Madera sana.....	167
Healthy wood	
V.2.2.3. Madera deteriorada.....	168
Decayed wood	
V.2.2.4. Material auxiliar.....	169
Auxiliary material	
V.2.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA .....	170
TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD	
V.2.3.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL.....	170
TESTS CONDUCTED ON STRUCTURAL SAMPLES	
V.2.3.1.1. Ensayos no destructivos (END).....	170
Non-destructive testing	
V.2.3.1.1.1. Preparación de las probetas para ensayo.....	170
Preparation of samples for testing	
V.2.3.1.1.2. Determinación de las propiedades físicas .....	171
Determination of physical properties	
V.2.3.1.1.3. Clasificación visual según UNE 56544:2007 .....	171
Visual grading according to UNE 56544:2007 Standard	
V.2.3.1.1.4. Medición de las velocidades de ultrasonidos.....	176
Measurement of ultrasound velocities	
* Factores que intervienen en las velocidades de ultrasonidos .....	176
* Factors involved in ultrasound velocities	
V.2.3.1.2. Ensayos destructivos.....	181
Destructive testing	
V.2.3.1.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR) .....	181
Determination of bending strength ( $f_m$ or MOR)	
V.2.3.1.2.2. Determinación del módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ o MOE).....	182
Determination of global modulus of elasticity ( $E_{m,g}$ or MOE)	

V.2.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS.....	184
TESTS CONDUCTED ON SMALL SAMPLES	
V.2.3.2.1. Ensayos no destructivos (END) .....	184
Non-destructive testing	
V.2.3.2.1.1. Preparación de las probetas para ensayo .....	184
Preparation of samples for testing	
V.2.3.2.1.2. Determinación propiedades físicas .....	184
Determination of physical properties	
V.2.3.2.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos .....	184
Measurement of ultrasound velocities	
V.2.3.2.2. Ensayos destructivos.....	185
Destructive testing	
V.2.3.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ ) .....	185
Determination of bending strength ( $f_m$ )	
V.2.3.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad	
longitudinal ( $E_L$ ) .....	185
Determination of longitudinal modulus of elasticity ( $E_L$ )	
V.2.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA.....	186
TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD	
V.2.4.1. Ensayos no destructivos.....	186
Non-destructive testing	
V.2.4.1.1. Determinación propiedades físicas .....	186
Determination of physical properties	
V.2.4.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos .....	186
Measurement of ultrasound velocities	
V.2.4.2. Ensayos destructivos.....	187
Destructive testing	
V.2.4.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ ) .....	187
Determination of bending strength ( $f_m$ )	

### **V.3. PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA. .... 189**

#### **EXPERIMENTAL PLAN FOR RESISTOGRAPH TESTING TO OBTAIN THE PHYSICAL PROPERTIES (DENSITY AND LOSS OF DENSITY) OF THE WOOD**

---

V.3.1. EQUIPOS UTILIZADOS .....	191
EQUIPMENT USED	
V.3.1.1. Resistógrafo .....	191
Resistograph	
V.3.1.2. Equipos auxiliares .....	191
Auxiliar equipment	
V.3.2. MATERIAL DE ENSAYO.....	192
MATERIAL FOR TESTING	
V.3.2.1. Madera sana .....	192
Healthy wood	
V.3.2.2. Madera deteriorada .....	192
Decayed wood	
V.3.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA .....	193
TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD	
V.3.3.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS.....	193
TESTS CONDUCTED ON COMPLETE SECTIONS	

V.3.3.1.1. Determinación del contenido de humedad de los troncos completos .....	193
Determination of moisture content in whole trunks	
V.3.3.1.2. Realización de las medidas de resistógrafo, RM .....	194
Resistograph measurements, RM	
V.3.3.1.3. Determinación de las propiedades físicas .....	195
Determination of physical properties	
V.3.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS .....	196
TESTS CONDUCTED ON SMALL SAMPLES	
V.3.3.2.1. Determinación de las medidas de resistógrafo, RM .....	196
Determination of Resistograph measurements, RM	
V.3.3.2.2. Determinación de las propiedades físicas .....	197
Determination of physical properties	
V.3.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA.....	198
TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD	
V.3.4.1. Determinación del contenido de humedad de las vigas.....	198
Determination of moisture content in the beams	
V.3.4.2. Realización de las medidas de resistógrafo .....	198
Resistograph measurements	
V.3.4.3. Determinación de la pérdida de densidad .....	199
Determination of density loss	

---

#### **V.4. PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS .....201**

#### **EXPERIMENTAL PLAN FOR DEVELOPING AN INSPECTION METHODOLOGY OF FLOOR STRUCTURES WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS BASED ON ULTRASOUND TESTING**

---

V.4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	203
IDENTIFYING THE PROBLEM	
V.4.2. EQUIPOS UTILIZADOS. FABRICACION DE UN NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS.....	204
EQUIPMENT USED. MANUFACTURE OF A NEW ULTRASOUND TRANSDUCER	
V.4.3. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO PALPADOR. CORRELACIÓN ENTRE PALPADORES DE ULTRASONIDOS.....	207
TESTS CONDUCTED USING THE NEW ULTRASOUND TRANSDUCER. CORRELATION BETWEEN THE ULTRASOUND TRANSDUCERS	
V.4.3.1. Mediciones exteriores .....	207
External measurements	
V.4.3.2. Mediciones interiores .....	208
Internal measurements	

---

#### **V.5. PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS .....211**

#### **EXPERIMENTAL PLAN FOR DEVELOPING A SYSTEM TO REPAIR AND/OR REINFORCE BEAMS**

---

V.5.1. ELECCIÓN DE MATERIALES .....	213
CHOICE OF MATERIALS	
V.5.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS REFUERZOS.....	215
REINFORCEMENTS MANUFACTURING PROCESS	
V.5.3. PREPARACIÓN DE LAS VIGAS REFORZADAS .....	218
PREPARATION OF THE REINFORCED BEAMS	



V.5.3.1. Refuerzos a cortante. Refuerzo de los apoyos .....	218
Shear strength reinforcements. Reinforcement of the supports	
V.5.3.2. Refuerzos a flexión. Refuerzo de los centros de vano .....	221
Bending strength reinforcements. Reinforcement of the beam midpoints	
V.5.4. ENSAYOS REALIZADOS .....	222
TESTS CONDUCTED	
V.5.4.1. Ensayos de cortante .....	222
Testing shear strength	
V.5.4.2. Ensayos de flexión .....	224
Testing bending strength	

## **CAPÍTULO VI. CHAPTER VI**

### **RESULTADOS DE LOS ENSAYOS. TEST RESULTS ..... 225**

#### **VI.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS ..... 227** RESULTS OF INFRARED THERMOGRAPHY TESTING

VI.1.1. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN SU TEMPERATURA SUPERFICIAL .....	229
STUDY OF THE INFLUENCE OF WOOD DENSITY ON SURFACE TEMPERATURE	
VI.1.2. DETECCIÓN DE DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD EN LA MADERA.....	232
DETECTION OF DIFFERENT MOISTURE CONTENTS IN WOOD	
VI.1.3. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU PROFUNDIDAD .....	234
DETECTION NON-SURFACE DEFECTS ACCORDING TO THEIR DEPTH	
VI.1.3.1. Defectos secos .....	234
Dry defects	
VI.1.3.2. Defectos húmedos .....	241
Wet defects	
VI.1.4. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU TAMAÑO .....	244
DETECTION NON-SURFACE DEFECTS ACCORDING TO THEIR SIZE	
VI.1.4.1. Defectos secos .....	244
Dry defects	
VI.1.4.2. Defectos húmedos .....	249
Wet defects	
VI.1.5. DETECCIÓN DE GALERÍAS INTERNAS EN LA MADERA .....	256
DETECTION OF INTERNAL GALLERIES IN THE WOOD	

#### **VI.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL ..... 257** RESULTS OF DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS TO OBTAIN THE RESISTANCE PARAMETERS AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE SCOTS PINE (*Pinus Sylvestris* L) AND CORSICAN PINE (*Pinus Nigra* Arnold) WOOD. CORRELATION TO VISUAL GRADING PARAMETERS

VI.2.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA.....	259
RESULTS OF THE TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD	

VI.2.1.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL .....	259
TESTS CONDUCTED ON STRUCTURAL SAMPLES	
VI.2.1.1.1. Ensayos no destructivos (END) .....	259
Nondestructive testing	
VI.2.1.1.1.1. Determinación de las propiedades físicas.....	259
Determination of physical properties	
VI.2.1.1.1.2. Clasificación visual según norma UNE 56544:2007/264	
Visual grading according to UNE 56544:2007 Standard	
VI.2.1.1.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos.....	271
Measurement of ultrasound velocities	
* Factores que intervienen en las velocidades de ultrasonidos .....	271
* Factors involved in ultrasound velocities	
A) Influencia de la humedad en las velocidades de transmisión en la madera de pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold) .....	271
Influence of moisture content on transmission velocities in the Corsican pine ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	
B) Determinación de la posición de los anillos de crecimiento en la madera de pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold). Coeficiente de conversión a velocidad normal.....	278
Determination of the position of growth rings in the Corsican pine ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold). Conversion coefficient to normal velocity	
C) Influencia de la distancia entre transductores en la velocidad de transmisión ultrasónica en la dirección perpendicular a la fibra.....	282
Influence of the distance between transducers on the velocity of ultrasound transmission perpendicular to the grain	
VI.2.1.1.2. Ensayos destructivos .....	308
Destructive testing	
VI.2.1.1.2.1. Determinación del módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ o MOE) .....	308
Determination of global modulus of elasticity ( $E_{m,g}$ or MOE)	
VI.2.1.1.2.2. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR) .....	309
Determination of bending strength ( $f_m$ or MOR)	
VI.2.1.1.3. Correlaciones de los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos.....	320
Correlations between the results from destructive and non-destructive tests	
VI.2.1.1.3.A. Correlaciones para la especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	321
Correlations for <i>Pinus Sylvestris</i> L	
VI.2.1.1.3.A.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	321
Relation between longitudinal velocity ( $V_L$ ) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.1.3.A.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE) .....	324
Relation between longitudinal speed ( $V_L$ ) and static modulus of elasticity (MOE)	
VI.2.1.1.3.A.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOE) y la resistencia a flexión (MOR) .....	327
Relation between static modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.1.3.A.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	330
Relation between dynamic modulus of elasticity ( $E_d$ ) and bending strength (MOR)	

VI.2.1.1.3.A.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (MOE) .....	334
Relation between dynamic ( $E_d$ ) and static modulus of elasticity (MOE)	
VI.2.1.1.3.B. Correlaciones para la especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold. ....	337
Correlations for <i>Pinus Nigra</i> Arnold	
VI.2.1.1.3.B.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	337
Relation between longitudinal speed ( $V_L$ ) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.1.3.B.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE) .....	337
Relation between longitudinal speed ( $V_L$ ) and static modulus of elasticity (MOE)	
VI.2.1.1.3.B.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOE) y la resistencia a flexión (MOR) .....	337
Relation between static modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.1.3.B.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	337
Relation between dynamic modulus of elasticity ( $E_d$ ) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.1.3.B.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (MOE) .....	337
Relation between dynamic modulus of elasticity ( $E_d$ ) and static modulus of elasticity (MOE)	
VI.2.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS .....	340
TESTS CONDUCTED ON SMALL SAMPLES	
VI.2.1.2.1. Ensayos no destructivos (END) .....	340
Non-destructive testing	
VI.2.1.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas .....	340
Determination of physical properties	
VI.2.1.2.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos .....	345
Measurement of ultrasound velocities	
VI.2.1.2.2. Ensayos destructivos .....	345
Destructive testing	
VI.2.1.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR) .....	345
Bending strength ( $f_m$ o MOR)	
VI.2.1.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad longitudinal ( $E_L$ ) .....	345
Longitudinal modulus of elasticity ( $E_L$ )	
VI.2.1.2.3. Correlaciones de los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos .....	350
Correlations between results from destructive and nondestructive testing	
VI.2.1.2.3.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	351
Relation between longitudinal speed ( $V_L$ ) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.2.3.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE) .....	351
Relation between longitudinal speed ( $V_L$ ) and static modulus of elasticity (MOE)	

VI.2.1.2.3.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOE) y la resistencia a flexión (MOR) .....	351
Relation between static modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.2.3.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E <sub>d</sub> ) y la resistencia a flexión (MOR) .....	351
Relation between dynamic modulus of elasticity (E <sub>d</sub> ) and bending strength (MOR)	
VI.2.1.2.3.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico (E <sub>d</sub> ) y estático (MOE) .....	351
Relation between dynamic modulus of elasticity (E <sub>d</sub> ) and static modulus of elasticity (MOE)	
<b>VI.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA .....</b>	<b>353</b>
RESULTS OF THE TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD	
VI.2.2.1. Ensayos no destructivos .....	353
Nondestructive testing	
VI.2.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas.....	353
Determination of physical properties	
VI.2.2.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos.....	356
Measurement of ultrasound velocities	
VI.2.2.1.3. Relación de la pérdida de densidad con la velocidad normal.....	358
Relation between loss of density and normal velocity	
VI.2.2.2. Ensayos destructivos .....	360
Destructive testing	
VI.2.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión (f <sub>m</sub> o MOR) ..	360
Determination of bending strength (f <sub>m</sub> or MOR)	
VI.2.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad longitudinal (E <sub>L</sub> ) .....	360
Determination of longitudinal modulus of elasticity (E <sub>L</sub> )	
VI.2.2.3. Correlaciones de los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos .....	363
Correlations between results from destructive and non-destructive testing	
<b>VI.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA.....</b>	<b>365</b>
RESULTS FROM RESISTOGRAPH TESTS TO OBTAIN THE PHYSICAL PROPERTIES (DENSITY AND DENSITY LOSS) OF THE WOOD	
<b>VI.3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA.....</b>	<b>367</b>
RESULTS OF THE TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD	
VI.3.1.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS .....	367
TESTS CONDUCTED ON COMPLETE SECTIONS	
VI.3.1.1.1. Determinación propiedades físicas.....	367
Determination of physical properties	
VI.3.1.1.2. Medidas de resistógrafo, RM.....	369
Resistograph measurements, RM	
VI.3.1.1.3. Correlación entre los resultados de los ensayos .....	371
Correlation between test results	
VI.3.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS .....	372
TESTS CONDUCTED ON SMALL SAMPLES	

VI.3.1.2.1. Ensayos sobre pequeñas probetas de longitud variable .....	372
Tests conducted on small samples of variable length	
VI.3.1.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas .....	372
Determination of physical properties	
VI.3.1.2.1.2. Medidas de resistógrafo, RM y RM' .....	374
Resistograph measurements, RM and RM'	
VI.3.1.2.1.3. Correlación entre los resultados de los ensayos ....	376
Correlation between test results	
VI.3.1.2.2. Ensayos sobre pequeñas probetas de 20 mm de longitud.....	378
Tests conducted on 20 mm long small samples	
VI.3.1.2.2.1. Determinación de las propiedades físicas .....	378
Determination of physical properties	
VI.3.1.2.2.2. Medidas de resistógrafo, RM y RM' .....	379
Resistograph measurements, RM and RM'	
VI.3.1.2.2.3. Correlación entre los resultados de los ensayos ....	380
Correlation between test results	
VI.3.1.3. VALIDACIÓN DE LAS EXPRESIONES OBTENIDAS.....	382
VALIDATION OF EXPRESSIONS OBTAINED	
VI.3.1.4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN SERVICIO. EL USO DE PEQUEÑAS PROBETAS DE 20 MM PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS DATOS .....	383
METHODOLOGY FOR OBTAINING THE DENSITY OF STRUCTURAL ELEMENTS IN SERVICE. USE OF 20 MM SAMPLES TO CALIBRATE DATA	
VI.3.1.4.1. Metodología de análisis global.....	384
Methodology of global analysis	
VI.3.1.4.2. Metodología de análisis individual .....	388
Methodology of individual analysis	
VI.3.1.4.3. Limitaciones de aplicación en obra de las metodologías desarrolladas .....	389
Limitations of on-site application of the methodologies developed	
VI.3.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA .....	392
RESULTS OF THE TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD	
VI.3.2.1. Determinación de las propiedades físicas.....	392
Determination of physical properties	
VI.3.2.2. Medidas de resistógrafo, RM .....	394
Resistograph measurements, RM	
VI.3.2.3. Correlación entre los resultados de los ensayos .....	396
Correlation between test results	

#### **VI.4. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS ..... 399**

**RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF AN INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH  
THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS BASED ON ULTRASOUND TESTING**

---

VI.4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS.....	401
RESULTS OF THE TESTS CONDUCTED USING THE NEW ULTRASOUND TRANSDUCER	
VI.4.1.1. Correlación entre palpadores de ultrasonidos .....	401
Correlation between the ultrasound transducers	
VI.4.1.1.1. Mediciones exteriores .....	401
External measurements	

VI.4.1.1.2. Mediciones interiores.....	403
Internal measurements	
VI.4.1.2. Determinación de la separación mínima entre palpadores, escuadría mínima de ensayo .....	404
Determination of the minimum distance between transducers, minimum size of sections tested	
VI.4.1.2.1. Ensayos realizados .....	404
Tests conducted	
VI.4.1.2.2. Estudio del error cometido .....	405
Error study	
VI.4.1.3. Criterios de aplicación de los nuevos palpadores de ultrasonidos .....	407
Criteria for applying the new ultrasound transducers	
VI.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN .....	408
PROPOSED INSPECTION METHODOLOGY OF FLOOR STRUCTURES WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS IN RESTORATION WORKS	
VI.4.2.1. Estudios previos de la edificación.....	408
Previous studies of the building	
VI.4.2.2. Estudio de viabilidad de la inspección mediante ensayos de ultrasonidos.....	408
Viability study of the inspection based on ultrasound testing	
VI.4.2.3. Plan de ensayos.....	408
Test plan	
VI.4.2.3.1. Medición del contenido de humedad.....	409
Measurement the moisture content	
VI.4.2.3.2. Ensayos de ultrasonidos. ....	409
Ultrasound testing	
VI.4.2.4. Determinación del número de vigas a ensayar. Plan de muestreo .....	411
Determination of the number of beams to be tested. Sampling plan	
VI.4.2.5. Limitaciones de aplicación en obra.....	417
Limitations of on-site application	
<b>VI.5. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS .....</b>	<b>419</b>
<b>RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO REPAIR AND/OR REINFORCE BEAMS</b>	
VI.5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS.....	421
RESULTS FROM THE TESTS CONDUCTED ON REINFORCED SAMPLES	
VI.5.1.1. Refuerzos a cortante. Refuerzos de los apoyos.....	421
Shear strength reinforcements. Reinforcement of the supports	
VI.5.1.2. Refuerzos a flexión. Refuerzos de los centros de vano .....	424
Bending strength reinforcements. Reinforcement of the beam midpoints	
VI.5.2. PUESTA EN OBRA Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE LOS EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS.....	428
ON-SITE INSTALLATION AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE PROPOSED SOLUTION FOR REPAIRING THE BEAM ENCASEMENTS	

## **CAPÍTULO VII. CHAPTER VII**

### **CONCLUSIONES. CONCLUSIONS..... 435**

#### **VII.1. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS .....437** **CONCLUSIONS OF INFRARED THERMOGRAPHY TESTING**

VII.1.1. ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS REALIZADOS EN LABORATORIO .439  
INFRARED THERMOGRAPHY TESTS CONDUCTED IN LABORATORY

VII.1.2. APLICACIÓN IN SITU DE LA TÉCNICA DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS .....444  
ON-SITE APPLICATION OF THE INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUE

#### **VII.2. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold) Y SU CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL.....445** **CONCLUSIONS OF DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTING TO OBTAIN THE RESISTANCE PARAMETERS AND PHYSICAL PROPERTIES OF SCOTS PINE (*Pinus Sylvestris* L) AND CORSICAN PINE (*Pinus Nigra* Arnold) WOOD. CORRELATION TO VISUAL GRADING PARAMETERS**

VII.2.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA .....447  
TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD

VII.2.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA ..... 455  
TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD

#### **VII.3. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA ..... 457** **CONCLUSIONS FROM RESISTOGRAPH TESTING TO OBTAIN THE PHYSICAL PROPERTIES (DENSITY AND DENSITY LOSS) OF THE WOOD**

VII.3.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA ..... 459  
TESTS CONDUCTED ON HEALTHY WOOD

VII.3.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA ..... 460  
TESTS CONDUCTED ON DECAYED WOOD

#### **VII.4. CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS ..... 461** **CONCLUSIONS ON THE DEVELOPMENT OF AN INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS BASED ON ULTRASONIC TESTING**

VII.4.1. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS ..... 463  
TESTS CONDUCTED USING THE NEW ULTRASOUND TRANSDUCER

VII.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN..... 464  
PROPOSED INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS IN RESTORATION WORKS

#### **VII.5. CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS..... 471** **CONCLUSIONS ON THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO REPAIR AND/OR REINFORCE BEAMS**

VII.5.1. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS ..... 473  
TESTS CONDUCTED ON REINFORCED SAMPLES

VII.5.2. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS ..... 473  
ECONOMIC ASSESSMENT OF THE PROPOSED SOLUTION FOR REPAIRING THE BEAM ENCASEMENTS

COROLARIO .....	475
COROLLARY .....	

---

<b>REFERENCIAS. REFERENCES</b> .....	<b>477</b>
--------------------------------------	------------

<b>1. CONSTRUCCIÓN EN MADERA</b> .....	<b>479</b>
CONSTRUCTION IN WOOD .....	

<b>2. DISEÑO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE MADERA</b> .....	<b>479</b>
DESIGN AND CALCULATION OF TIMBER STRUCTURES .....	

<b>3. CARACTERIZACIÓN Y/O EVALUACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL</b> .....	<b>480</b>
CHARACTERIZATION AND/OR EVALUATION OF STRUCTURAL WOOD .....	

<b>4. INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURAS DE MADERA. SOLUCIONES DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA</b> .....	<b>490</b>
INTERVENTION IN WOODEN STRUCTURES. SOLUTIONS FOR THE REPAIR AND/OR REINFORCEMENT OF WOODEN STRUCTURES .....	

<b>5. OTROS</b> .....	<b>492</b>
OTHERS .....	



**ANEJOS A-D. INSPECCIÓN DE EDIFICIOS. CASOS REALES ..... A 1**  
**ANNEXES A-D. DOCUMENT INSPECTION. CASE STUDIES.**

**ANEJO A. INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DEL ORATORIO DE SAN FELIPE NERI (CÁDIZ) .....A-A 3**  
**ANNEX A. INSPECTION OF THE ROOF OF THE SAN FELIPE NERI ORATORY (CÁDIZ)**

---

**A.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.....A-A 5**  
**BUILDING DESCRIPTION**

A.1.1. LESIONES .....A-A 7  
DAMAGE

**A.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DEL ORATORIO.A-A 8**  
**LOCATION OF STUDY AREA: THE WOODEN ROOF OF THE ORATORY**

**A.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....A-A 9**  
**STUDY METHODOLOGY**

A.3.1. INSPECCIÓN VISUAL.....A-A 9  
VISUAL INSPECTION

A.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO,  
ULTRASONIDOS.....A-A 9  
NON DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND

A.3.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos .....A-A 10  
Infrared thermography tests

A.3.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y del tiempo de  
transmisión de ultrasonidos .....A-A 12  
Tests to determine moisture content and ultrasound transmission time

**A.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO .....A-A 13**  
**ANALYSIS OF RESULTS. DIAGNOSIS**

A.4.1. INSPECCIÓN VISUAL.....A-A 13  
VISUAL INSPECTION

A.4.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO,  
ULTRASONIDOS.....A-A 13  
NON DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND

A.4.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos .....A-A 13  
Thermography tests

A.4.2.2. Ensayos de ultrasonidos .....A-A 15  
Ultrasound tests

**A.5. CONCLUSIONES.....A-A 15**  
**CONCLUSIONS**

**ANEJO B. INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE LA IGLESIA NTRA. SRA. DE LOS DOLORES**  
**(ISLA CRISTINA) ..... A-B 17**  
**ANNEX B. INSPECTION OF THE ROOF OF THE NTRA.SRA. DE LOS DOLORES CHURCH (ISLA CRISTINA)**

---

**B.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO ..... A-B 19**  
**BUILDING DESCRIPTION**

B.1.1. LESIONES. ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL EDIFICIO..... A-B 21  
DAMAGE. STATE OF CONSERVATION OF THE BUILDING

<b>B.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DE LA IGLESIA. A-B</b>	<b>21</b>
LOCATION OF STUDY AREA: THE WOODEN ROOF OF THE CHURCH	
<b>B.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....</b>	<b>A-B 22</b>
STUDY METHODOLOGY	
B.3.1. INSPECCIÓN VISUAL .....	A-B 23
VISUAL INSPECTION	
B.3.1.1. Clasificación visual según la norma UNE 56544:2007 .....	A-B 26
Visual grading according to UNE 56544:2007 Standard	
B.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS.....	A-B 28
NON-DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND	
B.3.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos .....	A-B 28
Thermography tests	
B.3.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y del tiempo de transmisión de ultrasonidos.....	A-B 29
Tests for determining the moisture content and ultrasound transmission time	
B.3.3. TOMA DE MUESTRAS. ENSAYOS DE LABORATORIO .....	A-B 35
SAMPLING. LABORATORY TESTS	
B.3.3.1. Identificación anatómica de la especie .....	A-B 35
Anatomical identification of the species	
B.3.3.2. Determinación de la densidad aparente .....	A-B 35
Determination of bulk density	
B.3.3.3. Medición de velocidad de ultrasonidos y determinación de la resistencia a flexión.....	A-B 35
Measurement of ultrasound velocity and determination of bending strength	
<b>B.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO .....</b>	<b>A-B 36</b>
ANALYSIS OF RESULTS. DIAGNOSIS	
B.4.1. INSPECCIÓN VISUAL .....	A-B 36
VISUAL INSPECTION	
B.4.1.1. Clasificación visual según la norma UNE 56544:2007 .....	A-B 36
Visual grading according to the UNE 56544:2007 standard	
B.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS.....	A-B 36
NON-DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND	
B.4.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos.....	A-B 36
Thermography tests	
B.4.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y velocidad de ultrasonidos.....	A-B 37
Tests for determining moisture content and ultrasound velocity	
B.4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	A-B 38
LABORATORY TESTS	
B.4.3.1. Determinación de la densidad aparente .....	A-B 38
Determination of bulk density	
B.4.3.2. Medición de velocidad de ultrasonidos y determinación de la resistencia a flexión.....	A-B 38
Measurement of ultrasound velocity and determination of bending strength	
<b>B.5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>A-B 39</b>
CONCLUSIONS	

**ANEJO C. INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE UNA NAVE LATERAL DE LA IGLESIA NTRA. SRA. DE LA GRANADA (MOGUER) ..... A-C 41**  
**ANNEX C. INSPECTION OF THE ROOF OF AN AISLE OF THE NTRA.SRA.DE LA GRANADA CHURCH (MOGUER)**

---

**C.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN..... A-C 43**  
**BUILDING DESCRIPTION**

**C.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DE UNA DE LAS NAVES LATERALES (PATIO DE LOS NARANJOS) ..... A-C 47**  
**LOCATION OF STUDY AREA: THE WOODEN ROOF OF AN OF THE AISLES (ORANGE TREE COURTYARD)**

**C.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO ..... A-C 47**  
**STUDY METHODOLOGY**

C.3.1. INSPECCIÓN VISUAL ..... A-C 48  
VISUAL INSPECTION

C.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA. TOMA DE DATOS ..... A-C 50  
NON-DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND AND RESISTOGRAPHY. DATA COLLECTION

C.3.2.1. Ensayos de termografía ..... A-C 50  
Thermography tests

C.3.2.2. Ensayos de ultrasonidos y medición del contenido de humedad (xilohigrómetro) ..... A-C 52  
Ultrasound tests and measurement of moisture content (higrometer)

C.3.2.2.3 Ensayos de resistógrafo ..... A-C 57  
Resistograph tests

**C.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO ..... A-C 58**  
**ANALYSIS OF RESULTS. DIAGNOSIS**

C.4.1. INSPECCIÓN VISUAL ..... A-C 58  
VISUAL INSPECTION

C.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA..... A-C 59  
NON-DESTRUCTIVE TESTING (END): THERMOGRAPHY, HYGROMETER, ULTRASOUND AND RESISTOGRAPHY

C.4.2.1. Ensayos de termografía..... A-C 59  
Thermography tests

C.4.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad, de medición del tiempo de transmisión ultrasónico y resistografía ..... A-C 59  
Measurement of moisture content, ultrasound tests and resistography

**C.5. CONCLUSIONES..... A-C 65**  
**CONCLUSIONS**

**ANEJO D. INSPECCIÓN DE UN FORJADO DE ENTREVIGADO CUAJADO DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL (SEVILLA) .....A-D 67**  
**ANNEX D. INSPECTION OF A FLOOR STRUCTURE WITH THE SPACE FILLED BETWEEN BEAMS IN A RESIDENTIAL BUILDING (SEVILLA)**

---

**D.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN .....A-D 69**  
**BUILDING DESCRIPTION**

<b>D.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. EL FORJADO DE MADERA DE PLANTA BAJA.....</b>	<b>A-D 70</b>
LOCATION OF STUDY AREA: THE WOODEN FLOOR STRUCTURE OF GROUND FLOOR	
<b>D.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....</b>	<b>A-D 70</b>
STUDY METHODOLOGY	
D.3.1. INSPECCIÓN VISUAL .....	A-D 71
VISUAL INSPECTION	
D.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS. TOMA DE DATOS .....	A-D 72
NON DESTRUCTIVE TESTING (END): HYGROMETER, ULTRASOUND. DATA COLLECTION	
D.3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO .....	A-D 79
LABORATORY TESTS	
<b>D.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO .....</b>	<b>A-D 81</b>
ANALYSIS OF RESULTS. DIAGNOSIS	
D.4.1. INSPECCIÓN VISUAL .....	A-D 81
VISUAL INSPECTION	
D.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA.....	A-D 81
NON DESTRUCTIVE TESTING (END): HYGROMETER, ULTRASOUND AND RESISTOGRAPHY	
<b>D.5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>A-D 87</b>
CONCLUSIONS	

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura IV.1:</b> Criterio general de medición de nudos en cara y en canto. (UNE 56544:2007) .	34
<b>Figura IV.2:</b> Nudos superficiales en la cara interna. (UNE 56544:2007) .....	34
<b>Figura IV.3:</b> Criterio de medición y evaluación de nudos de arista. (UNE 56544:2007).....	34
<b>Figura IV.4:</b> Criterio de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación. (UNE 56544:2007) .....	35
<b>Figura IV.5:</b> Criterio de definición de nudos agrupados. (UNE 56544:2007) .....	35
<b>Figura IV.6:</b> Criterio de medición de nudos agrupados. (UNE 56544:2007) .....	35
<b>Figura IV.7:</b> Criterio de medición de fendas. (UNE 56544:2007) .....	36
<b>Figura IV.8:</b> Criterio de medición de espesor de los anillos de crecimiento. (UNE 56544:2007) .....	36
<b>Figura IV.9:</b> Criterio de medición de gemas. (UNE 56544:2007) .....	38
<b>Figura IV.10:</b> Relación entre la velocidad de propagación y el porcentaje de pérdida de peso. (Wilcox, W., 1988) .....	44
<b>Figura IV.11:</b> Metodología de medición de las velocidades de propagación de ultrasonidos (a) En la dirección perpendicular a la fibra, b) En la dirección paralela a la fibra). (Arriaga, F., 1992) .....	45
<b>Figura IV.12:</b> Influencia de la Tª sobre la velocidad de ultrasonidos para diferentes contenidos de humedad. (Sandoz, 1989) .....	47
<b>Figura IV.13:</b> Representación gráfica de la fórmula de Hankinson sobre el efecto de la dirección de la fibra en las propiedades de la madera. (USDA, 1987). .....	49
<b>Figura IV.14:</b> Metodología de medición de las velocidades de ultrasonidos en las vigas. (Rajeshawar et al., 1997) .....	49
<b>Figura IV.15:</b> Equipo SYLVATEST empleado para los ensayos de ultrasonidos con transductores de 22 KHz. (Rajeshawar et al., 1997) .....	50
<b>Figura IV.16:</b> Probetas de ensayo (a) Probetas originales para ensayos de ultrasonidos de 50x50x300 mm³ y probetas de 50x50x100 mm³ para ensayos destructivos, b) División de las probetas en grupos en función de la orientación de los anillos de crecimiento). (Lourenço P. et al., 2006) .....	51
<b>Figura IV.17.</b> Metodología de medición de ultrasonidos para el estudio de la influencia de la inclinación de la fibra sobre las velocidades (a) Longitudinales, b) Transversales y c) y d) Con un ángulo α). (Acuña et al., 2006) .....	54
<b>Figura IV.18.</b> Estudio de la influencia de la longitud de las probetas sobre la velocidad de ultrasonidos. Corte de las piezas hasta llegar a una longitud de 50 cm. (Acuña et al., 2006) .	54
<b>Figura IV.19.</b> Relación entre la velocidad de ultrasonidos (m/s) y la dirección de las fibras. (Acuña et al., 2006) .....	55

<b>Figura IV.20.</b> Mediciones longitudinales situando los palpadores en las testas de las piezas. (Acuña et al., 2006) .....	55
<b>Figura IV.21.</b> Distribución de las poblaciones de calidades reales y determinación de $V_0$ . (Acuña et al., 2006) .....	57
<b>Figura IV.22.</b> Metodología de medición de la velocidad longitudinal de ultrasonidos en las piezas (a) Piezas de 200x250 mm, b) Piezas de 80x80 mm). (Arriaga, 2006) .....	58
<b>Figura. IV.23.</b> Energía radiada en el rango de infrarrojos desde un cuerpo. (Elaboración propia) .....	65
<b>Figura IV.24.</b> Probetas empleadas para el ensayo de carga. (Luong,1996). ....	66
<b>Figura IV.25.</b> Imágenes infrarrojas del ensayo. (Luong,1996).....	67
<b>Figura IV.26.</b> Temperatura superficial en función del grado de humedad para el pino. (J. Abedi y S. Banerjee, 1999) .....	67
<b>Figura. IV.27.</b> Variación de la absorción de las muestras de pino en función del contenido de humedad. (Ludwig et al., 2004) .....	68
<b>Figura IV.28.</b> Coeficiente angular del incremento de temperatura sobre muestras de pino con diferentes contenidos de humedad. (Ludwig et al., 2004) .....	69
<b>Figura IV.29.</b> Coeficiente angular del incremento de temperatura sobre una viga de pino con diferentes contenidos de humedad. (Ludwig et al., 2004).....	69
<b>Figura IV.30.</b> Incremento de temperatura en una viga de roble al calentar con el haz en función de la humedad. (Ludwig et al., 2004) .....	70
<b>Figura IV.31.</b> Distinción a través de la termografía de nudos saltadizos.(Meinlschmidt, 2005) 72	
<b>Figura IV.32.</b> Temperatura superficial de seis muestras de especies de madera en función de la densidad y del tiempo de enfriamiento. (Tanaka, 2000).....	74
<b>Figura IV.33.</b> Temperatura superficial de seis especies distintas en función de la densidad. (Tanaka, 2000) .....	75
<b>Figura IV.34.</b> Dimensiones y geometría en milímetros de las cinco probetas utilizadas en el ensayo. (Tanaka, 2000) .....	75
<b>Figura IV.35.</b> Calentamiento de la superficie a lo largo del tiempo. (Tanaka, 2000) .....	76
<b>Figura IV.36.</b> Diferencias de temperatura a lo largo del tiempo. La probeta se sitúa a 45cm de la lámpara. El periodo de calentamiento terminó a los 0s (a) Muestra C, b) Muestra B). (Tanaka, 2000) .....	76
<b>Figura IV.37.</b> Diferencias de temperatura en la muestras B, D y E a lo largo del tiempo. Estas temperaturas son tomadas en la cara no calentada. (Tanaka, 2000).....	76
<b>Figura IV.38.</b> Forma de los defectos en las probetas (1, defecto en estrella; 2, defecto en cuarto de círculo; 3, defecto en círculo; 4, defecto irregular). (Maldague, 2001) .....	79
<b>Figura IV.39.</b> Modelo teórico: calentamiento a través de un agujero interno y a través de la superficie, defecto con forma de estrella. Curvas de diferencia de temperatura. Potencia de calentamiento 2500 W durante 550 s. Medidas durante 1200 s. (Maldague, 2001).....	80
<b>Figura IV.40.</b> Madera putrefacta con diferentes contenidos de humedad. Potencia de calentamiento 2500W durante 550s. (Maldague, 2001) .....	81

<b>Figura. IV.41.</b> Madera con defectos por debajo de la superficie a diferentes profundidades. Potencia de calentamiento 2500W durante 550 s. (Maldague, 2001) .....	81
<b>Figura. IV.42.</b> Geometría usada para el estudio teórico de los modos de reflexión y transmisión. (Maldague, 2001).....	82
<b>Figura. IV.43.</b> Modelo teórico usando las geometrías de la Figura IV.36. (Maldague, 2001) ...	82
<b>Figura. IV.44.</b> Ensayos en reflexión con muestras con defectos secos y húmedos. La geometría se ha extraído de la Figura IV.42 para el caso a y b. El caso c no se estudia por las dimensiones de la muestra y el defecto y su dificultad para un calentamiento homogéneo. (Maldague, 2001) .....	83
<b>Figura. IV.45.</b> Ensayos en reflexión tras el calentamiento durante 2 minutos en un microondas doméstico. Geometría de la Figura IV.36. (Maldague, 2001) .....	84
<b>Figura IV.46.</b> Ensayos en transmisión sobre muestras con perforaciones. (Maldague, 2001) ...	84
<b>Figura IV.47.</b> Perfil resistográfico de una madera sana. Diferencia entre la madera de verano y la madera de primavera. (Elaboración propia) .....	89
<b>Figura IV.48.</b> Tipología de las probetas de ensayo (a. Probetas Tipo A, b. Probetas Tipo B, c. Probetas Tipo C) .....	92
<b>Figura IV.49.</b> Tipología de forjados de entrevigado cuajado. (Casinello Pérez, F. "Construcción. Carpintería") .....	95
<b>Figura IV.50.</b> Metodología de ultrasonidos aplicada a la inspección de forjados (a. Medidas realizadas en cada sección, b. Selección de secciones en las vigas) .....	96
<b>Figura IV.51.</b> Relación entre resistencia y tamaño. (Lam et al., 1990) .....	103
<b>Figura IV.52.</b> Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión. (UNE EN 408:2011) .....	108
<b>Figura IV.53.</b> Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica. (UNE EN 408:2011) .....	109
<b>Figura IV.54.</b> Dispositivo de ensayo con los requisitos respecto a la colocación especificada de los captadores de giro. (UNE EN 408:2011) .....	111
<b>Figura IV.55.</b> Dispositivo de ensayo en el campo de cizalladura. (UNE EN 408:2011) .....	112
<b>Figura IV.56.</b> Deformación del cuadrado y las diagonales. (UNE EN 408:2011) .....	112
<b>Figura IV.57.</b> Ensayo para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia en tracción paralela a la fibra. (UNE EN 408:2011) .....	113
<b>Figura IV.58.</b> Probeta de madera aserrada. (UNE EN 408:2011) .....	115
<b>Figura IV.59.</b> Fundamento de ensayo a la tracción o la compresión perpendicular a la fibra. (UNE EN 408:2011).....	115
<b>Figura IV.60.</b> Gráfico de carga/deformación (compresión). (UNE EN 408:2011) .....	116
<b>Figura IV.61.</b> Procedimiento de carga para determinar la resistencia a esfuerzo cortante paralelo a la fibra. (UNE EN 408:2011) .....	117
<b>Figura IV.62.</b> Influencia del número de muestras y de su tamaño sobre el coeficiente Ks. (UNE 384:2010) .....	120

<b>Figura IV.63.</b> Metodología general del trabajo por procedencias. (Fernández-Golfín et al., 2001) .....	125
<b>Figura IV.64:</b> Apeo de las cabezas de las vigas con una línea adosada al muro (carrera de madera, perfil metálico y ménsula de hormigón armado). ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	131
<b>Figura IV.65:</b> Refuerzo del apoyo de la viga mediante encepado con dos piezas o simple adosado de otra viga. ....	132
<b>Figura IV.66:</b> Consolidación de vigas con madera (Mettem et. al., 1993.) .....	132
<b>Figura IV.67:</b> Consolidación de viga mediante madera encolada. (Landa, 1997) .....	133
<b>Figura IV.68:</b> Consolidación de la cabeza de la viga mediante listones de madera encolados .....	134
<b>Figura IV.69:</b> Aumento de la longitud de la viga mediante perfiles metálicos. ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	134
<b>Figura IV.70:</b> Secuencia de operaciones en la consolidación de una cabeza de viga mediante sistema Beta. (Promax, 1982) .....	135
<b>Figura IV.71:</b> Empalme de dos piezas con barras de acero y formulación epoxi (Mettem et al., 1993) .....	136
<b>Figura IV.72:</b> Empalme de dos piezas mediante 4 barras de acero en las esquinas encoladas con resina epoxi y listones perimetrales. ....	136
<b>Figura IV.73:</b> Consolidación de la cabeza de una viga mediante placas encoladas a la madera. ....	137
<b>Figura IV.74.:</b> Refuerzo de las viguetas de un forjado. ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	138
<b>Figura IV.75:</b> Consolidación con placas internas. ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	139
<b>Figura IV.76:</b> Longitud libre máxima de las placas de refuerzo. ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	139
<b>Figura IV.77:</b> Refuerzo de vigas fendadas mediante una armadura interior. (Promax, 1982) .....	140
<b>Figura IV.78:</b> Reconstrucción de la parte superior degradada de la sección con un mortero epoxi .....	141
<b>Figura IV.79:</b> Aumento de la sección de la viga con el acoplamiento de una pieza encolada. ....	141
<b>Figura IV.80:</b> Refuerzo de una viga con una armadura de fibra de carbono encolada a la madera. (Sika Carbodur) .....	142
<b>Figura IV.81:</b> Reparación puntual de una rotura mediante pletinas. Presenta poca eficacia. ( <i>"Intervención en estructuras de madera"</i> . AITIM) .....	142
<b>Figura IV.82:</b> Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos situados en la cara superior (González Bravo et al., 2010) .....	143
<b>Figura V.1.</b> Probetas de distintas especies (de izquierda a derecha: roble, álamo, eucalipto, pino, cedro) para ensayo. ....	154



<b>Figura V.2.</b> Serie 1. Probetas con defectos de igual tamaño (40x40 mm) situados a distintas profundidades (5, 10 y 15 mm).....	156
<b>Figura V.3.</b> Serie 1. Corte transversal de las probetas. Cotas en cm. ....	156
<b>Figura V.4.</b> Serie 2. Probetas con defectos de distintos tamaños (10x10, 20x20 y 40x40 mm) situados a profundidad constante (5 mm) .....	157
<b>Figura V.5.</b> Serie 2. Corte transversal de las probetas. Cotas en cm. ....	157
<b>Figura V.6.</b> Serie 1. Probetas con una columna de galerías en las que se varía la posición de éstas con respecto a la superficie.....	161
<b>Figura V.7.</b> Serie 1. Posición de las columnas de galerías con respecto a la superficie en cada caso. Cotas en cm. ....	161
<b>Figura V.8.</b> Serie 2. Probetas con un aumento progresivo del número de columnas de galerías.....	161
<b>Figura V.9.</b> Serie 2. Posición de las columnas de galerías con respecto a la superficie y separación entre columnas en cada caso. Cotas en cm.....	161
<b>Figura V.10.</b> Series 1 y 2. Situación de las probetas para ensayo. Las galerías quedan ocultas a la cámara termográfica. ....	162
<b>Figura V.11.</b> Equipo de ultrasonidos empleado en los ensayos .....	165
<b>Figura V.12.</b> Prensa multiensayo marca Suzpecar y modelo MEM-101/M4 .....	166
<b>Figura V.13.</b> Vigas de madera deteriorada para la extracción de pequeñas probetas.....	168
<b>Figura V.14.</b> Lote de 15 piezas de madera de pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold) de dimensiones 90x120x300 mm. ....	169
<b>Figura V.15.</b> "Rebanadas" de 30 mm de espesor extraídas de una viga de 150 mm de sección transversal.....	169
<b>Figura V.16.</b> Probetas de dimensiones 20x20x300 mm <sup>3</sup> sumergidas hasta conseguir su saturación.....	176
<b>Figura V.17.</b> Ejemplo de variabilidad de las velocidades de transmisión dentro de una sección.....	177
<b>Figura V.18.</b> Clasificación de las piezas en función de la posición de la fibra (a. Posición central, b. Posición extrema) .....	177
<b>Figura V.19.</b> Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas. ....	178
<b>Figura V.20.</b> Medidas de transmisión de ultrasonidos directas (a. Mediciones longitudinales, b. Mediciones normales y c. Mediciones tangenciales).....	179
<b>Figura V.21.</b> Medidas de transmisión de ultrasonidos semidirectas (Mediciones longitudinales cruzadas). ....	179
<b>Figura V.22.</b> Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad. ....	181
<b>Figura V.23.</b> Rotura de las probetas en la prensa.....	181

<b>Figura V.24.</b> Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica. ....	182
<b>Figura V.25.</b> Dispositivo de ensayo según norma UNE 56537:1979. ....	185
<b>Figura V.26.</b> Mediciones de la velocidad normal en las probetas de madera deteriorada. ....	186
<b>Figura V.27.</b> a. Resistógrafo empleado en los ensayos. b. Impresora que reproduce los datos durante el ensayo .....	191
<b>Figura V.28.</b> Probetas de madera sana para ensayo .....	192
<b>Figura V.29.</b> Vigas de madera deteriorada desmontadas para ensayo .....	192
<b>Figura V.30.</b> a. Sección completa para ensayo seleccionada dentro de cada tronco. b. Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en las proximidades de una sección de ensayo .....	193
<b>Figura V.31.</b> Medidas de resistógrafo perpendiculares realizadas en cada sección .....	194
<b>Figura V.32.</b> Perfil resistográfico, $RM_A$ o $RM_B$ , de una probeta .....	194
<b>Figura V.33.</b> Secciones sobre las que se han realizado los ensayos con el resistógrafo. Las líneas rotuladas marcan cada uno de los ejes de perforación. ....	195
<b>Figura V.34.</b> a. Medición de la masa de cada sección. b. Medición del volumen mediante el empuje experimentado .....	195
<b>Figura V.35.</b> Pequeñas muestras extraídas en las proximidades de las secciones anteriores .....	196
<b>Figura V.36.</b> Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en las proximidades de una sección de ensayo y siguiendo una dirección de los ejes de perforación. ....	196
<b>Figura V.37.</b> Perfil resistográfico, $RM_A$ o $RM_B$ de una probeta de 51 mm de longitud (a los 60 mm de profundidad hay que descontar el recorrido de la aguja hasta que penetra en la madera, en este caso, 9 mm aproximadamente) .....	196
<b>Figura V.38.</b> a. Selección de las secciones de ensayo dentro de cada viga. b. Selección de las alturas de ensayo dentro de cada sección .....	198
<b>Figura V.39.</b> Realización de las medidas de resistógrafo sobre las vigas de madera deteriorada .....	198
<b>Figura V.40.</b> Realización de las medidas de ultrasonidos sobre las secciones ensayadas con resistógrafo .....	199
<b>Figura V.41.</b> Metodología de ultrasonidos aplicada a la inspección de forjados (a. Medidas realizadas en cada sección, b. Selección de secciones en las vigas) .....	203
<b>Figura V.42.</b> Palpadores de ultrasonidos cónicos empleados para la fabricación del nuevo transductor. ....	204
<b>Figura V.43.</b> Procedimientos de medición con ultrasonidos (a. Transmisión directa, b. Transmisión semidirecta, c. Transmisión indirecta) .....	205
<b>Figura V.44.</b> Palpador tradicional de ultrasonidos desmontado para la fabricación del nuevo palpador .....	205

<b>Figura V.45.</b> Fabricación de cabezales para el nuevo palpador. Se manejan dos longitudes: 9 cm y 15 cm.....	206
<b>Figura V.46.</b> Proceso de montaje del nuevo palpador .....	206
<b>Figura V.47.</b> Nuevo palpador con el cabezal de 15 cm.....	206
<b>Figura V.48.</b> Secciones A, B, C y D marcadas sobre la viga tipo. ....	208
<b>Figura V.49.</b> Distintas alturas marcadas sobre cada sección. ....	208
<b>Figura V.50.</b> Separación de taladros variable en la dirección normal. Viga 1 .....	209
<b>Figura V.51.</b> Separación de taladros variable en la dirección normal. Viga 2.....	209
<b>Figura V.52.</b> Separación de taladros variable en la dirección longitudinal. Viga 2 .....	209
<b>Figura V.53.</b> Preparación de la plancha de refuerzo: malla de fibra de vidrio colocada sobre el material soporte (dimensiones 594 x 841 mm) .....	215
<b>Figura V.54.</b> Preparación de la resina de poliéster con el catalizador .....	215
<b>Figura V.55.</b> Aplicación de la resina de poliéster .....	216
<b>Figura V.56.</b> Plancha de refuerzo tras aplicar la resina de poliéster.....	216
<b>Figura V.57.</b> Corte de las planchas de refuerzo en placas (1).....	217
<b>Figura V.58.</b> Corte de las planchas de refuerzo en placas (2).....	217
<b>Figura V.59.</b> Vigas y placas de refuerzo preparadas para aplicar la resina epoxi (1) .....	219
<b>Figura V.60.</b> Vigas y placas de refuerzo preparadas para aplicar la resina epoxi (2) .....	219
<b>Figura V.61.</b> Longitudes de los refuerzos en función del ensayo realizado (a. Longitud de placa coincidente con el punto de aplicación de la carga. b. Longitud de placa 50 mm superior sobre el punto de aplicación de la carga. c. Longitud de placa 100 mm superior sobre el punto de aplicación de la carga) .....	220
<b>Figura V.62.</b> Vigas ranuradas y reforzadas para el ensayo de flexión.....	221
<b>Figura V.63.</b> Metodología de ensayo a cortante según UNE EN 1168:2005 .....	222
<b>Figura V.64.</b> Estado real de cargas de una viga en un forjado. Carga continua .....	223
<b>Figura V.65.</b> Diagrama de cortantes en una viga derivado de una carga continua .....	223
<b>Figura V.66.</b> Estado de cargas de una viga durante el ensayo. ....	223
<b>Figura V.67.</b> Diagrama de cortantes en una viga derivado de una carga puntual. ....	223
<b>Figura V.68.</b> Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de las probetas reforzadas.....	224
<b>Figura VI.1.</b> Relación entre la densidad media de la madera y su temperatura superficial	229
<b>Figura VI.2.</b> Temperatura superficial de la madera en diferentes instantes del proceso de enfriamiento .....	230

<b>Figura VI.3.</b> Temperatura superficial (°C) de la madera en función de su contenido de humedad (%) .....	232
<b>Figura VI.4.</b> Termograma obtenido para la serie 1 en la fase de termografía pasiva. No es posible diferenciar ningún defecto alguno en las probetas independientemente de la profundidad de éstos .....	235
<b>Figura VI.5.</b> Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa .....	236
<b>Figura VI.6.</b> Defecto situado a 10 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa .....	236
<b>Figura VI.7.</b> Defecto situado a 15 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa .....	236
<b>Figura VI.8.</b> Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco 0,70 m .....	238
<b>Figura VI.9.</b> Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco 0,35 m .....	238
<b>Figura VI.10.</b> Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	242
<b>Figura VI.11.</b> Defecto situado a 10 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	242
<b>Figura VI.12.</b> Defecto situado a 15 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	242
<b>Figura VI.13.</b> Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa .....	245
<b>Figura VI.14.</b> Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa .....	245
<b>Figura VI.15.</b> Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco: 0,35 m .....	247
<b>Figura VI.16.</b> Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco: 0,35 m .....	247
<b>Figura VI.17.</b> Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	250
<b>Figura VI.18.</b> Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	250
<b>Figura VI.19.</b> Defecto de 10x10 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa .....	250

<b>Figura VI.20.</b> Probeta 1. Relación entre la velocidad normal y la humedad .....	273
<b>Figura VI.21.</b> Probeta 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad .....	273
<b>Figura VI.22.</b> Probeta 2. Relación entre la velocidad normal y la humedad .....	275
<b>Figura VI.23.</b> Probeta 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad. ....	275
<b>Figura VI.24.</b> Probetas 1 y 2. Relación entre la velocidad normal y la humedad. ....	276
<b>Figura VI.25.</b> Probetas 1 y 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad. ....	277
<b>Figura VI.26.</b> Posición de fibra centrada (a. Posición central, b. Posición central-extrema). ...	279
<b>Figura VI.27.</b> Casos de posición de fibra extrema (a. Posición extrema, b. Posición extrema-central). ....	281
<b>Figura VI.28.</b> Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas .....	282
<b>Figura VI.29.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	287
<b>Figura VI.30.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	287
<b>Figura VI.31.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	287
<b>Figura VI.32.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	287
<b>Figura VI.33.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	289
<b>Figura VI.34.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	289
<b>Figura VI.35.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	289
<b>Figura VI.36.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	289
<b>Figura VI.37.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales en las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	291
<b>Figura VI.38.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	291
<b>Figura VI.39.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	291
<b>Figura VI.40.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	291
<b>Figura VI.41.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales en las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold. ....	296

<b>Figura VI.42.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales en las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold. ....	296
<b>Figura VI.43.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales en las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold. ....	296
<b>Figura VI.44.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	299
<b>Figura VI.45.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	299
<b>Figura VI.46.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	299
<b>Figura VI.47.</b> Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad. Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	299
<b>Figura VI.48.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	301
<b>Figura VI.49.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	301
<b>Figura VI.50.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	301
<b>Figura VI.51.</b> Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	301
<b>Figura VI.52.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	303
<b>Figura VI.53.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	303
<b>Figura VI.54.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	303
<b>Figura VI.55.</b> Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad Rechazo: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	303
<b>Figura VI.56.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	321
<b>Figura VI.57.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	322
<b>Figura VI.58.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	323
<b>Figura VI.59.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva y vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	324
<b>Figura VI.60.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	325

<b>Figura VI.61.</b> Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) ..	326
<b>Figura VI.62.</b> Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	327
<b>Figura VI.63.</b> Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	328
<b>Figura VI.64.</b> Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	329
<b>Figura VI.65.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	331
<b>Figura VI.66.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	332
<b>Figura VI.67.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	333
<b>Figura VI.68.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva y vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	334
<b>Figura VI.69.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	335
<b>Figura VI.70.</b> Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera vieja de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	336
<b>Figura VI.71.</b> Relación entre la pérdida de densidad y la velocidad normal de ultrasonidos para madera deteriorada de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	358
<b>Figura VI.72.</b> Relación entre la velocidad normal de ultrasonidos y la resistencia a flexión para madera deteriorada de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	359
<b>Figura VI.73.</b> Sección de ensayo dentro de cada tronco .....	367
<b>Figura VI.74.</b> Medidas de resistógrafo realizadas en cada sección .....	369
<b>Figura VI.75.</b> Perfil resistográfico, $RM_A$ o $RM_B$ , de una probeta .....	369
<b>Figura VI.76.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM$ .....	371
<b>Figura VI.77.</b> Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en una zona próxima a la sección 1 .....	372
<b>Figura VI.78.</b> Perfil resistográfico, $RM_A$ o $RM_B$ de una probeta de 51 mm de longitud (a los 60 mm de profundidad hay que descontar el recorrido de la aguja hasta que penetra en la madera, en este caso, 9 mm aproximadamente) .....	374
<b>Figura VI.79.</b> Perfil resistográfico, $RM'_A$ o $RM'_B$ de una probeta de 51 mm de longitud descontando el tramo de penetración en la madera .....	374
<b>Figura VI.80.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM$ , para las pequeñas probetas de longitud variable. ....	376



<b>Figura VI.81.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM'$ (descontando el primer tramo del perfil resistográfico), para las pequeñas probetas de longitud variable. ....	377
<b>Figura VI.82.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM$ para las pequeñas probetas de 20 mm de longitud. ....	380
<b>Figura VI.83.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM'$ (descontando el primer tramo del perfil resistográfico), para las pequeñas probetas de 20 mm de longitud. ....	381
<b>Figura VI.84.</b> Estudio del error cometido mediante la aplicación de la regresión. ....	385
<b>Figura VI.85.</b> Histograma de los coeficientes parciales de determinación. ....	386
<b>Figura VI.86.</b> Estudio del error medio porcentual de cada una de las 51 curvas de regresión parciales. ....	386
<b>Figura VI.87.</b> Coeficientes de determinación en función del número de probetas que conforman la muestra. ....	387
<b>Figura VI.88.</b> Metodología de análisis individual ....	388
<b>Figura VI.89.</b> Perfi resistográfico y de densidad obtenido para una sección ....	388
<b>Figura VI.90.</b> Medidas de resistógrafo realizadas en cada sección de las vigas de madera deteriorada ....	394
<b>Figura VI.91.</b> Correlación entre la densidad de la madera, $d$ , y las medidas de resistógrafo, $RM$ . ....	396
<b>Figura VI.92.</b> Mediciones exteriores e interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con el nuevo palpador de ultrasonidos. ....	403
<b>Figura VI.93.</b> Mediciones perpendiculares a la fibra (normales) realizadas en la sección exterior de las vigas. ....	409
<b>Figura VI.94.</b> Mediciones longitudinales cruzadas realizadas en la sección exterior de las vigas. ....	409
<b>Figura VI.95.</b> Corrección de los valores de la ecuación inicial dada por Acuña et al. en 2006 para la obtención del valor de velocidad de ultrasonidos para la especie de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) en función del ángulo de inclinación de la fibra ....	410
<b>Figura VI.96.</b> Mediciones perpendiculares a la fibra (normales) realizadas en las secciones interiores de las vigas. En estas mediciones se aumenta paulatinamente la profundidad de la inspección desde 3, 6 a 9 cm de profundidad ....	410
<b>Figura VI.97.</b> Metodología de ensayo a cortante según UNE EN 1168:2005 ....	421
<b>Figura VI.98.</b> Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad ....	424
<b>Figura VI.99.</b> Puesta en obra de la solución de reparación del empotramiento de una viga ....	431
<b>Figura A.1.</b> Planimetría del Oratorio (a. Planta baja. b. Planta por la galería del nivel 1) . <b>A-A</b>	<b>5</b>
<b>Figura A.2.</b> Planimetría del Oratorio (a. Planta galería del nivel 2. b. Planta por la galería del nivel 3)..... <b>A-A</b>	<b>6</b>



<b>Figura A.3.</b> Vista interior la cúpula. Triple balconada sobre cornisas .....	<b>A-A 6</b>
<b>Figura A.4.</b> Estructura interior de la cúpula encamionada .....	<b>A-A 6</b>
<b>Figura A.5.</b> Grietas verticales en la cúpula .....	<b>A-A 7</b>
<b>Figura A.6.</b> Refuerzos metálicos de reparaciones anteriores .....	<b>A-A 7</b>
<b>Figura A.7.</b> Estructura de la cubierta. (a. Distribución de vigas y pares. b. Sección) .....	<b>A-A 8</b>
<b>Figura A.8.</b> Deterioro generalizado de la tablazón .....	<b>A-A 9</b>
<b>Figura A.9.</b> Par atacado por pudrición parda .....	<b>A-A 9</b>
<b>Figura A.10.</b> Vista de conjunto del interior de la cubierta .....	<b>A-A 10</b>
<b>Figura A.11.</b> Deterioro superficial de un par .....	<b>A-A 10</b>
<b>Figura A.12.</b> Fendas en un par .....	<b>A-A 11</b>
<b>Figura A.13.</b> Nudos en un par .....	<b>A-A 11</b>
<b>Figura A.14.</b> Empalme con madera nueva .....	<b>A-A 11</b>
<b>Figura A.15.</b> Localización de los pares donde se realizan ensayos de ultrasonidos.....	<b>A-A 12</b>
<b>Figura B.1.:</b> Exterior de la Iglesia de Ntra. Sra. de Los Dolores (Figura extraída de <a href="http://huelva.turismoenpueblos.es/isla-cristina-nace-con-felipe-v-y-la-iglesia-de-ntra-sra-de-los-doce-apostoles/252/">http://huelva.turismoenpueblos.es/isla-cristina-nace-con-felipe-v-y-la-iglesia-de-ntra-sra-de-los-doce-apostoles/252/</a> ) .....	<b>A-B 19</b>
<b>Figura B.2.</b> Planta de la Iglesia. El espacio principal se organiza en 3 naves (Nave Mayor y las Naves del Evangelio y la Epístola) .....	<b>A-B 20</b>
<b>Figura B.3.</b> Deterioro de los revestimientos de las pilastras con afloración de sales .....	<b>A-B 21</b>
<b>Figura B.4.</b> Planta de cubiertas de la Iglesia. Localización de la zona de estudio (cubierta de la Nave Mayor y Crucero) .....	<b>A-B 22</b>
<b>Figura B.5.</b> Vista general de cada área de estudio (a. Nave Mayor. b. Coro. c. Crucero.) .....	<b>A-B 24</b>
<b>Figura B.6.</b> Vistas de la inspección de la Nave Mayor (a. Plafones deteriorados en el área A1 (lateral izquierdo de la Nave Mayor). b. Cata abierta en el área A2 (lateral derecho de la Nave Mayor). c. Fenda longitudinal en el tirante T6. d. Desplazamiento de la unión en Rayo de Júpiter causada por la flecha) .....	<b>A-B 25</b>
<b>Figura B.7.</b> Vistas de la inspección del Coro (a. Vista general del deterioro del Coro. b. Pudrición del friso) .....	<b>A-B 25</b>
<b>Figura B.8.</b> Cambio de color de la tablazón del Crucero.....	<b>A-B 25</b>
<b>Figura B.9.</b> Ataque de termitas en una muestra extraída de la cata C4 .....	<b>A-B 26</b>
<b>Figura B.10.</b> Termografía general de la Nave Mayor .....	<b>A-B 28</b>
<b>Figura B.11.</b> Termografía del Crucero (I) .....	<b>A-B 28</b>
<b>Figura B.12.</b> Termografía del Crucero (II) .....	<b>A-B 29</b>

<b>Figura B.13:</b> Identificación microscópica de la especie (a. Vista radial, b. Vista transversal) .....	<b>A-B 35</b>
<b>Figura C.1.</b> Imagen aérea. Localización de la Iglesia.....	<b>A-C 43</b>
<b>Figura C.2.</b> Planta de la Iglesia por nave central.....	<b>A-C 44</b>
<b>Figura C.3.</b> Planta baja.....	<b>A-C 45</b>
<b>Figura C.4.</b> Sección A-A' .....	<b>A-C 46</b>
<b>Figura C.5.</b> Alzado Principal.....	<b>A-C 46</b>
<b>Figura C.6.</b> Localización de la nave lateral a inspeccionar .....	<b>A-C 47</b>
<b>Figura C.7.</b> Vista general de la cubierta .....	<b>A-C 48</b>
<b>Figura C.8.</b> Aspecto blanquecino de los pares debido al elevado contenido de humedad ambiente .....	<b>A-C 48</b>
<b>Figura C.9.</b> Pudrición de la madera en los empotramientos .....	<b>A-C 49</b>
<b>Figura C.10.</b> Ataque de carcoma común.....	<b>A-C 49</b>
<b>Figura C.11.</b> Fenda de gran apertura que recorre toda la longitud del par .....	<b>A-C 49</b>
<b>Figura C.12.</b> Estructura de cubierta de pares y ladrillo por tabla .....	<b>A-C 50</b>
<b>Figura C.13.</b> Humedades existentes en los ladrillos situados sobre los pares.....	<b>A-C 51</b>
<b>Figura C.14.</b> Humedades en los empotramientos.....	<b>A-C 51</b>
<b>Figura C.15.</b> Procedimiento de realización de los ensayos de resistógrafo .....	<b>A-C 57</b>
<b>Figura D.1.</b> Planimetría del edificio.....	<b>A-D 69</b>
<b>Figura D.2.</b> Localización de la zona de estudio.....	<b>A-D 70</b>
<b>Figura D.3.</b> Forjado de inspección pintado y con restos de cañas de sujeción del falso techo (I) .....	<b>A-D 71</b>
<b>Figura D.4.</b> Forjado de inspección pintado y con restos de cañas de sujeción del falso techo (II) .....	<b>A-D 71</b>
<b>Figura D.5.</b> Selección de alturas de ensayo dentro de cada sección para análisis de resistógrafo .....	<b>A-D 79</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla IV.1.</b> Clases resistentes. Valores característicos.....	124
<b>Tabla V.1:</b> Densidades medias de las distintas especies de ensayo. ....	154
<b>Tabla V.2:</b> Humedades de las piezas en el momento de realización del ensayo .....	155
<b>Tabla V.3.</b> Duración de las etapas de calentamiento y enfriamiento de cada fase de ensayo para cada una de las series.....	159
<b>Tabla V.4.</b> Contenido de humedad en cada probeta antes de la estimulación térmica en la estufa.....	159
<b>Tabla V.5.</b> Contenido de humedad en cada probeta tras la estimulación térmica en la estufa.....	160
<b>Tabla V.6.</b> Criterios de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007 .....	172
<b>Tabla V.7.</b> Valores de las cargas puntuales obtenidos en el ensayo de cortante sobre las probetas testigo (P) y su extrapolación a cargas continuas.....	224
<b>Tabla VI.1:</b> Densidades medias de las distintas especies de ensayo .....	229
<b>Tabla VI.2.</b> Contenido de humedad alcanzado por las probetas el día de ensayo .....	232
<b>Tabla VI.3.</b> Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	260
<b>Tabla VI.4.</b> Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	261
<b>Tabla VI.5.</b> Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	262
<b>Tabla VI.6.</b> Criterios de medición de defectos y singularidades de la norma UNE 56544 ....	264
<b>Tabla VI.7.</b> Clasificación visual de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L. ....	265
<b>Tabla VI.8.</b> Clasificación visual de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	266
<b>Tabla VI.9.</b> Clasificación visual de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	267
<b>Tabla VI.10.</b> Densidades, media y característica, de las probetas de madera nueva en función de su clasificación visual y especie .....	268
<b>Tabla VI.11.</b> Densidades, media y característica, de las probetas de madera nueva y vieja de la especie pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) en función de su clasificación visual.....	269
<b>Tabla VI.12.</b> Mediciones de velocidad de ultrasonidos longitudinal y normal durante el proceso de secado de la Probeta 1 .....	272
<b>Tabla VI.13.</b> Mediciones de velocidad de ultrasonidos longitudinal y normal durante el proceso de secado de la Probeta 2.....	274
<b>Tabla VI.14.</b> Velocidades normales para posición de fibra centrada .....	279

<b>Tabla VI.15.</b> Determinación del coeficiente corrector de la velocidad media para posición de fibra centrada.....	280
<b>Tabla VI.16.</b> Velocidades normales para posición de fibra extrema.....	281
<b>Tabla VI.17.</b> Determinación del coeficiente corrector de la velocidad media para posición de fibra extrema.....	281
<b>Tabla VI.18.</b> Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas .....	282
<b>Tabla VI.19.</b> Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	286
<b>Tabla VI.20.</b> Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	288
<b>Tabla VI.21.</b> Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	290
<b>Tabla VI.22.</b> Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ , $V_L/V_T$ , $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	292
<b>Tabla VI.23.</b> Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	293
<b>Tabla VI.24.</b> Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	294
<b>Tabla VI.25.</b> Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	295
<b>Tabla VI.26.</b> Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ , $V_L/V_T$ , $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	297
<b>Tabla VI.27.</b> Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	298
<b>Tabla VI.28.</b> Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L .....	300
<b>Tabla VI.29.</b> Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	302
<b>Tabla VI.30.</b> Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ , $V_L/V_T$ , $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	304
<b>Tabla VI.31.</b> Módulos de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	310
<b>Tabla VI.32.</b> Módulos de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	313
<b>Tabla VI.33.</b> Módulo de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera vieja: especie <i>Pinus Sylvestris</i> L.....	315
<b>Tabla VI.34.</b> Densidad, contenido de humedad y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las pequeñas probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	341
<b>Tabla VI.35.</b> Velocidades de transmisión longitudinales, $V_L$ , normales, $V_N$ , y tangenciales a la fibra, $V_T$ , referidas al 12% de humedad de las pequeñas probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold.....	342

<b>Tabla VI.36.</b> Relación entre velocidades de transmisión de las pequeñas probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	343
<b>Tabla VI.37.</b> Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	346
<b>Tabla VI.38.</b> Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas sin azulado de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	347
<b>Tabla VI.39.</b> Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas con azulado de madera nueva: especie <i>Pinus Nigra</i> Arnold .....	347
<b>Tabla VI.40.:</b> Pérdidas de densidad referidas al 12% de humedad de las probetas de madera deteriorada .....	354
<b>Tabla VI.41.:</b> Velocidades normales en función de las pérdidas de densidad de las probetas de madera deteriorada .....	356
<b>Tabla VI.42.</b> Resistencia a flexión y módulo de elasticidad real de las probetas de madera deteriorada .....	361
<b>Tabla VI.43.</b> Densidad y humedad de las probetas de ensayo determinada mediante norma ASTM-D2395-07ae1 .....	368
<b>Tabla VI.44.</b> Mediciones radiales de resistógrafo, $RM_A$ y $RM_B$ , y media, $RM$ en cada probeta .....	370
<b>Tabla VI.45.</b> Densidad y humedad de las pequeñas probetas .....	371
<b>Tabla VI.46.</b> Mediciones completas de resistógrafo, $RM$ , y mediciones de resistógrafo descontando el primer tramo del perfil resistográfico, $RM'$ , en las pequeñas probetas .....	375
<b>Tabla VI.47.</b> Densidad y humedad de las pequeñas probetas de 20 mm de longitud .....	378
<b>Tabla VI.48.</b> Mediciones completas de resistógrafo, $RM$ , y mediciones de resistógrafo descontando el primer tramo del perfil resistográfico, $RM'$ , en las pequeñas probetas de 20 mm de longitud .....	379
<b>Tabla VI.49.</b> Relación entre la densidad real y la densidad estimada según las distintas expresiones .....	382
<b>Tabla VI.50.</b> Relación del error cometido entre la densidad real y la densidad estimada en cada caso .....	382
<b>Tabla VI.51.</b> Coeficientes de correlación obtenidos por diversos autores en la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo .....	383
<b>Tabla VI.52.</b> Humedad y pérdida de densidad referida al 12% de humedad de cada una de las secciones de ensayo de las 5 vigas de madera deteriorada .....	393
<b>Tabla VI.53.</b> Humedad y medida de resistógrafo de cada una de las secciones de ensayo de las 5 vigas de madera deteriorada .....	395
<b>Tabla VI.54.</b> Mediciones exteriores longitudinales a la fibra realizadas con los dos palpadores de ultrasonidos .....	402
<b>Tabla VI.55.</b> Mediciones exteriores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con los dos palpadores de ultrasonidos .....	402
<b>Tabla VI.56.</b> Mediciones exteriores e interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con el nuevo palpador de ultrasonidos .....	403

<b>Tabla VI.57.</b> Mediciones interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas sobre la Viga 1 (Capítulo IV.4.3.2) reduciendo la separación entre las perforaciones.....	405
<b>Tabla VI.58.</b> Mediciones interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas sobre la Viga 2 (Capítulo IV.4.3.2) reduciendo la separación entre las perforaciones.....	405
<b>Tabla VI.59.</b> Estudio de la influencia de una variabilidad de 3 $\mu$ s de tiempo sobre las velocidades de ultrasonidos dependiendo de la escuadría de la sección o separación entre los transductores. Velocidad normal teórica supuesta de 1800 m/s .....	406
<b>Tabla VI.60.</b> Estudio de la influencia de una variabilidad de 3 $\mu$ s de tiempo sobre las velocidades de ultrasonidos dependiendo de la escuadría de la sección o separación entre los transductores. Velocidad normal teórica supuesta de 1500 m/s .....	406
<b>Tabla VI.61.</b> Muestreo estadístico según los valores de Nivel de Confianza Aceptable (NCA) de la norma ISO 3443:1988. Parte 7 .....	411
<b>Tabla VI.62.</b> Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por una capa de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables.....	422
<b>Tabla VI.63.</b> Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Especie pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold) .....	423
<b>Tabla VI.64.</b> Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Especie pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L) .....	423
<b>Tabla VI.65.</b> Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Probetas de dimensiones 45x45x900 mm <sup>3</sup> .....	425
<b>Tabla VI.66.</b> Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Probetas de dimensiones 50x50x1000 mm <sup>3</sup> .....	425
<b>Tabla A.1.</b> Condiciones ambientales de los días de realización de los ensayos.....	<b>A-A 10</b>
<b>Tabla A.2.</b> Resultados de ensayos de ultrasonidos .....	<b>A-A 15</b>
<b>Tabla B.1.</b> Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura < 70 mm .....	<b>A-B 27</b>
<b>Tabla B.2.</b> Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura > 70 mm) .....	<b>A-B 27</b>
<b>Tabla B.3.</b> Condiciones ambientales de los días de realización de los ensayos .....	<b>A-B 28</b>
<b>Tabla B.4.</b> Valores de densidad aparente, velocidad de ultrasonidos y carga de rotura obtenidos en las probetas .....	<b>A-B 35</b>
<b>Tabla B.5.</b> Resultados de los ensayos de ultrasonidos .....	<b>A-B 37</b>
<b>Tabla B.6.</b> Resultados de los ensayos de determinación de densidad .....	<b>A-B 38</b>
<b>Tabla B.7.</b> Valores de resistencia a flexión estimados a partir de las velocidades de ultrasonidos .....	<b>A-B 38</b>
<b>Tabla B.8.</b> Resultados de los ensayos de flexión de las pequeñas probetas.....	<b>A-B 38</b>
<b>Tabla C.I.</b> Condiciones ambientales del día de la inspección .....	<b>A-C 51</b>

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar debo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido durante estos años en mi labor formativa, tanto científica como humana.

A mi directora Carmen Rodríguez Liñán por su inestimable ayuda, conocimientos y enseñanza, y sobre todo por transmitirme su rigurosidad científica y su buen hacer. A mi directora Paloma Rubio de Hita por su confianza y apoyo.

A los miembros del laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I (Reyes, Carlos, Domingo y José Luis de Rojas) por cederme las instalaciones y por su ayuda en los numerosos ensayos realizados.

A la empresa Vorsevi y a sus miembros del Departamento Técnico de Vorsevi (José Antonio) por la cesión de sus instalaciones, materiales y equipos, y por contribuir en el desarrollo experimental.

A los miembros del Laboratorio de Ingeniería Civil de Lisboa por su buena acogida y apoyo en este trabajo, especialmente a José Saporiti Machado por su colaboración.

A mis niñas Rosalía, Cristina y Rocío, por su grata colaboración en este trabajo.

A mis amigos, por su apoyo y porque también han contribuido en algunos ensayos.

A mis padres, a mi hermana y a Manu por transmitirme su ánimo y comprensión en los momentos de desánimo y, lo más importante, por su paciencia infinita.

Por último, me gustaría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han facilitado día a día mi labor. Probablemente sin ser conscientes de ello, han contribuido en el desarrollo de mis investigaciones. Con esta breve mención me gustaría reconocer a cada uno de ellos su disposición, amabilidad y ayuda, sin las cuales no puedo imaginar estos años de trabajo.





# RESUMEN

## I. INTRODUCCIÓN. CONSIDERACIONES PREVIAS E HIPÓTESIS DE PARTIDA

## II. OBJETIVOS

## III. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

III.1. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ESTRUCTURAS DE MADERA: CLASIFICACIÓN VISUAL Y TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVAS

- III.1.1. La clasificación visual de la madera
- III.1.2. La técnica de ultrasonidos
- III.1.3. La termografía de infrarrojos
- III.1.4. El resistógrafo

III.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA: ENSAYOS DESTRUCTIVOS

III.3. SOLUCIONES DE CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS FORJADOS DE MADERA: VIGAS Y VIGUETAS

## IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

IV.1. ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

IV.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS (LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y LA CLASIFICACIÓN VISUAL) PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DE LA MADERA

IV.3. ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO

# ABSTRACT

## I. INTRODUCTION.PREVIOUS CONSIDERATIONS AND HYPOTHESIS

## II. OBJECTIVES

## III. CURRENT STATE OF KNOWLEDGE

III.1. NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF WOODEN STRUCTURES: VISUAL GRADING AND NONESTRUCTIVE TESTING METHODS

- III.1.1. Wood visual grading
- III.1.2. Ultrasound technique
- III.1.3. Infrared thermography
- III.1.4. Resistograph

III.2. DESCRIPTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD: DESTRUCTIVE TESTING

III.3. SOLUTIONS FOR CONSOLIDATING OR REINFORCING STRUCTURAL ELEMENTS IN WOODEN FLOOR STRUCTURES: BEAMS AND JOINTS

## IV. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

IV.1. INFRARED THERMOGRAPHY TESTING

IV.2. DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTING (ULTRASOUND TESTING AND VISUAL GRADING) TO DETERMINE STRENGTH PARAMETERS OF WOOD

IV.3. RESISTOGRAPH TESTING

IV.4. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO

IV.5. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS

IV.4. DEVELOPING AN INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH INFILL BETWEEN BEAMS

IV.5. DEVELOPING A SYSTEM FOR BEAM REPAIR AND/OR REINFORCEMENT

## **V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

V.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

V.1.1. Ensayos realizados en laboratorio

V.1.2. Aplicación in situ de la técnica

V.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS (LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y LA CLASIFICACIÓN VISUAL) PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES

V.2.1. Ensayos realizados sobre madera sana

V.2.2. Ensayos realizados sobre madera deteriorada

V.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA

V.3.1. Ensayos realizados sobre madera sana

V.3.2. Ensayos realizados sobre madera deteriorada

V.4. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO

V.5. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS

## **V. DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS**

V.1. RESULTS FROM INFRARED THERMOGRAPHY TESTS

V.1.1. Tests conducted in laboratory

V.1.2. On-site tests

V.2. RESULTS FROM DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS (ULTRASOUND TESTING AND VISUAL GRADING) TO DETERMINE STRENGTH PARAMETERS OF WOOD

V.2.1. Tests conducted on healthy wood

V.2.2. Tests conducted on decayed wood

V.3. RESULTS FROM RESISTOGRAPH TESTS TO OBTAIN PHYSICAL PROPERTIES OF WOOD (DENSITY AND DENSITY LOSS)

V.3.1. Tests conducted on healthy wood

V.3.2. Tests conducted on decayed wood

V.4. RESULTS OF THE INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH INFILL BETWEEN BEAMS

V.5. RESULTS OF THE SYSTEM FOR BEAM REPAIR AND/OR REINFORCEMENT

## **COROLARIO**

## **COROLLARY**

## **I. INTRODUCCIÓN. CONSIDERACIONES PREVIAS E HIPÓTESIS DE PARTIDA**

En los últimos años, gracias a una nueva conciencia social en la que se unen los conceptos de sostenibilidad y patrimonio, se ha desarrollado un interés creciente por la recuperación y preservación del patrimonio arquitectónico, en el que con frecuencia, las estructuras de madera toman un papel protagonista.

Así, cuando nos enfrentamos a un proyecto de rehabilitación o restauración arquitectónica de un edificio existente, surge la necesidad de contar con herramientas y métodos de inspección y análisis que permitan tener un conocimiento objetivo de la realidad del edificio y de su estado de conservación. El desconocimiento o la falta de información pueden conducir a un diagnóstico erróneo y desembocar en un proyecto de actuación poco acertado.

Referido al estudio y diagnóstico de las estructuras de madera, forjados y cubiertas, las metodologías de inspección actuales reguladas por una base normativa, basan su estudio en el análisis visual de sus elementos. La necesidad de complementar los resultados aportados por esta metodología ha provocado que, en las últimas décadas, se hayan desarrollado líneas de investigación que han insistido en el estudio de nuevas herramientas de evaluación que apoyen las tareas de inspección y diagnóstico de estas estructuras.

En este contexto, la elección del tema del presente trabajo de investigación responde

## **I. INTRODUCTION. PRIOR CONSIDERATIONS AND HYPOTHESIS**

*In recent years, thanks to a new social awareness of sustainability and heritage, there has been a growing interest in the recovery and preservation of architectural heritage of which wooden structures are a principle part.*

*Therefore, when planning the rehabilitation or restoration of an existing building, it is important to be able to count on reliable tools and inspection methods to gain objective knowledge of the building and its conservation state. Ignorance or lack of information can lead to misdiagnosis and restoration work that is inappropriate.*

*Regarding the study and diagnosis of wooden structures, floor structures and roofs, current inspection methodologies that comply with the standards are based on visual grading. Yet there is a need to complement the results obtained by these methodologies which has led to new lines of research that focus on the study of new tools that assess these structures.*

*In this context, the research topic of the present study continues the work of the TEP-*

a la línea de estudio iniciada por el Grupo de Investigación TEP-205: "Análisis y Evaluación de Sistemas Constructivos y Estructurales en la Arquitectura". Este trabajo supone la continuación de las investigaciones precedentes recogidas, entre otros, en los siguientes documentos:

- Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

- Rodríguez Liñán, C, Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Sevilla. Universidad de Sevilla (2000). 165 págs. ISBN: 8447206572.

Mediante estos trabajos se iniciaron los estudios sobre la inspección no destructiva de estructuras de madera, fundamentalmente forjados. Estas investigaciones se centran en el uso de la técnica de ultrasonidos para evaluar el estado de conservación y/o deterioro de las estructuras de madera en servicio en las obras de rehabilitación.

205 Investigation Group's Analysis and Evaluation of Structural and Construction Systems in Architecture. Our study extends this earliest research, which can be found in the following documents:

- Rubio de Hita, P. "Assessment of the condition of wood in buildings under restoration based on ultrasound techniques. PhD thesis. University of Sevilla. School of Architecture (1997).

- Rodríguez Liñán, C, Rubio de Hita, P. "Assessment of the condition of wood in buildings under restoration based on ultrasound techniques. Sevilla. University of Sevilla (2000). 165 pages. ISBN: 8447206572.

These studies initiated research into the Non-Destructive inspection of wooden structures, especially of wooden floor structures, focusing on ultrasound techniques to assess the state of conservation and/or decay of wooden structures under restoration.

## II. OBJETIVOS

De este modo, desde el presente trabajo se pretende avanzar en este campo del conocimiento para dotar a los técnicos de nuevas herramientas y/o métodos que le permitan inspeccionar y diagnosticar con fiabilidad las estructuras de madera presentes en los edificios a rehabilitar. Con todo ello se plantean los siguientes objetivos prioritarios:

### 1. Desarrollar nuevos métodos/herramientas de inspección complementarios a los ya existentes.

Para ello se plantea:

- Estudio de las posibilidades de la termografía de infrarrojos como técnica complementaria de inspección no destructiva.
- Estudio de las posibilidades del resistógrafo como técnica no destructiva para la estimación de la densidad y la pérdida de densidad de la madera.
- Desarrollo de un método de inspección y análisis mediante la técnica de ultrasonidos para su aplicación a los forjados de entrevigado cuajado.

### 2. Actualizar los métodos de inspección mediante la técnica de ultrasonidos empleados hasta el momento.

- Revisión de las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos para la madera de pino silvestre (*Pinus*

## II. OBJECTIVES

*This work aims to extend this subject area in order to give architects new tools or/and methods to inspect and reliably assess wooden structures in buildings under restoration. The priority objectives of this research are:*

### 1. Developing new inspection tools/methods that complement those currently in use.

*To this end, the following studies have been carried out:*

- *Study of infrared thermography as a possible Non-Destructive inspection technique.*
- *Study of the resistograph as a possible Non-Destructive technique to determine density and loss of density in wood elements.*
- *Development of a new method based on ultrasound techniques to inspect and analyze floor structures with infill between beams.*

### 2. Updating current inspection methods using ultrasound techniques.

- *Review of the equations which correlate ultrasound transmission speeds in Scots Pine *Pinus Sylvestris* L to strength parameters (bending*

*Sylvestris* L) con parámetros resistentes (resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad estático (MOE)) a partir de los ensayos con probetas de tamaño estructural de acuerdo a las nuevas normativas de obligado cumplimiento.

*strength [MOR] and static modulus of elasticity [MOE]) obtained with structural size test pieces, in compliance with new regulations in force.*

Asimismo, en este caso, se propone como un objetivo complementario discriminar entre las especies pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) debido a su similitud anatómica para establecer las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos con los parámetros resistentes en cada caso.

*Likewise, as a complementary objective, the proposed differentiation between Pinus Nigra Arnold and Pinus Sylvestris L. wood species, establishing the equations which correlate ultrasound transmission speeds to bending strength, using structural size samples.*

3. Paralelamente, se plantea avanzar en el desarrollo de un sistema para la reparación y/o refuerzo de vigas.

3. *In addition, the aim is to develop a system of beam repair and reinforcement.*

### III. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

#### III.1. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE ESTRUCTURAS DE MADERA: CLASIFICACIÓN VISUAL Y TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVAS

##### III.1.1. La clasificación visual de la madera

Desde la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación en 2006 en el que se incluye la madera como material estructural, equiparándose con otros materiales usados en estructuras, surge la necesidad de desarrollar herramientas que complementen los métodos de clasificación utilizados hasta el momento con el objetivo de garantizar la calidad del material en el mercado.

En el marco de la Unión Europea cada país ha desarrollado unas normas propias de clasificación visual de la madera siguiendo sus propios criterios y adaptándose a sus especies más frecuentes. Los parámetros de clasificación de estas normas están basados en las singularidades ligadas a la anatomía de la madera, al aserrado de las piezas y, finalmente consideran si se ha producido alguna alteración de tipo biológico por hongos o insectos xilófagos. En España, el método de clasificación normalizado está basado en la clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural a través de las normas UNE 56544 (para coníferas) y 56546 (para frondosas). Su criterio de clasificación distingue dos calidades: ME-1 y ME-2, referidas a piezas cuyo grosor es menor a 70 mm; y MEG, para piezas con un grosor superior.

### III. CURRENT STATE OF KNOWLEDGE

#### III.1. NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF WOODEN STRUCTURES: VISUAL GRADING AND NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

##### III.1.1. Wood visual grading

Since the Código Técnico de la Edificación state regulations came into force in Spain in 2006, which classified wood as a structural material, investigators have sought out new tools to complement the methods used until then with the aim of guaranteeing the quality of material in the market.

Each country in the European Union has developed its own standards in terms of wood visual grading, according to specific criteria and the main tree species in each country. These standards establish grading criteria based on singularities related to the anatomy of wood, to the sawing of the pieces and possible biological alteration caused by fungi or xylophagous insects. In Spain, visual grading of structural timber is regulated by the UNE 56544 (coniferous) and 56546 (deciduous) standards, with two quality grades, ME-1 and ME-2 for pieces less than 70 mm thick, and the MEG classification for pieces that are broader.

Esta metodología de clasificación visual está vinculada fundamentalmente a la madera nueva para estructuras. Sin embargo, la inexistencia de otros métodos de clasificación reconocidos a nivel normativo implica que se emplee para analizar la madera de estructuras preexistentes. De su aplicación en estos casos surgen una serie de dificultades que cuestionan su eficacia:

- Es necesario conocer el tipo de madera para saber qué normativa de clasificación visual aplicar. La norma analizada UNE 56544 es aplicable únicamente a la madera de coníferas.
- Es necesario acceder a la estructura para poder llevar a cabo una medición de los defectos. En ocasiones esto no es posible ya que la cara superior de las piezas está oculta por la tablazón o, en el caso de forjados de entrevigado cuajado, tan solo se encuentran al descubierto la cara inferior de los pares. En otros casos la superficie aparece pintada o con suciedad las cuales impiden ver sus defectos.
- Su aplicabilidad está sujeta a la subjetividad del operario.

Todas estas circunstancias hacen necesario el desarrollo de nuevos métodos de ensayo complementarios para la evaluación de la madera puesta en obra que nos permita, de forma fácil y fiable, establecer su capacidad resistente. Asimismo, en caso de haberse producido alteraciones biológicas, como pudriciones o ataques por insectos xilófagos, determinar la magnitud de la alteración y/o la pérdida de densidad producida así como la resistencia residual de la estructura resultante.

### III.1.2. La técnica de ultrasonidos

El fundamento de la técnica de ultrasonidos se basa en medir el tiempo de transmisión de una onda ultrasónica en el interior del material. Esta medición aporta información sobre el grado de compactidad interna del material y detecta si existen irregularidades.

El empleo de la técnica de los ultrasonidos sobre madera se remonta a los años 50 del siglo pasado. Desde entonces son muchos

*This visual grading method mainly relates to new structural wood, but it is also used to assess structural wood in existing buildings due to the lack of other methodologies in current standards. The difficulties arising in such cases question the effectiveness of this method, therefore:*

- *It is necessary to acquire a good knowledge of the wood type to decide which of the visual grading standards is applicable. The UNE 56544 standard must only be used with conifers.*
- *It is necessary to gain good access to the structure to be able to measure its defects. Sometimes this is not possible as the tops of the beams are hidden by planking or, in the case of floor structures, by infill, in which case only the base of the beam is visible. In other cases, the beams may have been painted or are dirty, so it is impossible to clearly identify defects.*
- *Visual grading by these standards is often subjective.*

*This calls for new complementary testing methods to thoroughly assess wood pieces and reliably and determine the biological alterations caused by decay or xylophages insects. Such methods need to determine the extent of damage, loss of density and the strength of the existing wooden structures under such conditions.*

### III.1.2. Ultrasound technique

*The ultrasound technique is based on measuring the transmission time of an ultrasound wave inside the material. This measurement informs us of the compactness of the material and detects any irregularities.*

*This technique has been applied to wood since the 1950s, and numerous studies state that the results usefully complement visual*



los estudios que avalan con sus resultados la aplicabilidad de esta técnica como técnica complementaria a la clasificación visual proporcionando unos mejores rendimientos (Sandoz, 1989). Asimismo el precio, relativamente bajo de los equipos, y su fácil transporte y manejabilidad contribuyen en cierta medida al éxito de esta herramienta. En este campo de la investigación mediante ultrasonidos se han abierto dos líneas de estudio:

1. Evaluación de la capacidad resistente de la madera nueva en aserraderos, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos (Sandoz, 1989, Hermoso Prieto, 2001, Acuña et al. 2006, Iñiguez González, 2007).
2. Cuantificación del estado de deterioro de estructuras de madera en obras de rehabilitación, a partir de la velocidad normal de ultrasonidos (Aggour, 1984, Navarrete y Troya 1994, Palaia y Galván, 1994).

Los trabajos realizados dentro del Grupo de Investigación TEP-205 abarcan ambas líneas de estudio y están basados en el procedimiento operatorio de la norma UNE 56537 de 1979 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática". En esta norma las probetas de ensayo tienen una escuadría de 20x20 mm y una longitud de 300 mm. En 2004, la norma UNE 384 "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad" establece que el método para la determinación de los valores característicos con ensayos sobre pequeñas probetas se permite solo para las frondosas. Este nuevo marco normativo implica la necesidad de revisar las correlaciones aportadas en trabajos precedentes de acuerdo a las nuevas condiciones de ensayo, sobre todo teniendo en cuenta que la casi totalidad de los forjados de madera de nuestro entorno son de madera de coníferas.

### III.1.3. La termografía de infrarrojos

El uso de la termografía en la madera es relativamente reciente. Las primeras investigaciones sobre su aplicabilidad se centran en los años 90 en la Universidad de Stuttgart, Alemania donde se inician unos

*grading (Sandoz, 1989). Moreover, ultrasound equipment is relatively cheap and easy to use and transport. There are two lines of research in this field:*

1. *Assessment of the strength of new wood in sawmills, based on longitudinal ultrasound transmission speeds (Sandoz, 1989, Hermoso Prieto, 2001, Acuña et al. 2006, Iñiguez González, 2007).*
2. *Quantifying the state of decay of wooden structures under restoration, based on longitudinal ultrasound transmission speeds (Aggour, 1984, Navarrete & Troya 1994, Palaia & Galván, 1994).*

*The TEP-205 Investigation Group has developed both these lines of research and it follows procedures set down in the UNE 56537 (1979) standard: Physical and mechanical properties of wood. Determining static bending strength. Accordingly, test specimens measure 20x20 mm and are 300 mm in length. In 2004, the UNE 384 standard Structural wood. Determining characteristic values of mechanic properties and density established that the method for determining characteristic values in small-sized specimens is only valid for deciduous trees. This new standard requires the correlations in previous works to be revised in line with the new test conditions.*

### III.1.3. Infrared thermography

*Thermography applied to wood is relatively recent. The initial research into its applicability took place in the 90s at Stuttgart University (Germany) and focused on Non-Destructive methods to assess*

estudios pioneros empleando este nuevo método de evaluación no destructiva sobre polímeros y compuestos de madera (Busse et al. 1988, 1994, 2001).

polymers and wood composites (Busse et al. 1988, 1994, 2001).

La aplicación de la termografía de infrarrojos en la madera está limitada por las propiedades térmicas de este material. Su baja conductividad térmica y difusividad hacen que sea necesario emplear una fuente externa de calor para provocar un flujo de energía en el cuerpo inspeccionado. Es lo que se ha denominado termografía activa. El objetivo es poder identificar parámetros de la muestra a través de un análisis comparativo del estado previo y tras la estimulación.

The application of infrared thermography to wood is limited by its thermal properties. Low thermal conductivity and diffusion in wood make it necessary to use an external heating source to produce an energy flow inside the element under inspection, namely thermography. The objective is to identify the sample parameters by a comparative analysis of the state of the wood before and after stimulation.

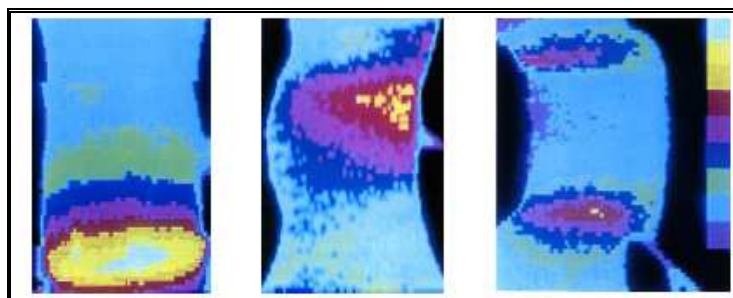
A pesar de estas limitaciones, se ha estudiado la aplicabilidad de la termografía de infrarrojos en la madera en diferentes situaciones:

Despite these limitations, infrared thermography has been tested on wood in various situations:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Localización de estados tensionales de agotamiento (Masuda, 1995, Luong, 1996 (Figura 01)).                                   | 1. Location of wood fatigue (Masuda, 1995, Luong, 1996 [Figure 01]).   |
| 2. Detección de humedades (Abedi y Banerjee, 1999, Ludwing et al. 2004).   | 2. Damps detection (Abedi & Banerjee, 1999, Ludwing et al. 2004).  |
| 3. Control de calidad de acabados (Mattone, 1999, Meinschmidt, 2005, Niemz, 2006).   | 3. Quality control in finished woods (Mattone, 1999, Meinschmidt, 2005, Niemz, 2006).                                    |
| 4. Detección de defectos internos: oquedades, pudriciones (Tanaka 2000, Wyckhuyse y Maldague, 2001, Kandemir-Yucel et al, 2007). | 4. Detection of internal defects: cavities, decay (Tanaka 2000, Wyckhuyse & Maldague, 2001, Kandemir-Yucel et al, 2007). |
| 5. Detección de termitas (Gilbert, 1999).  | 5. Detection of termites (Gilbert, 1999).  |

En todos los casos, las investigaciones realizadas hasta el momento se desarrollan en fase de laboratorio y no permiten extraer resultados concluyentes sobre las aportaciones de la termografía en la inspección in situ de estructuras.

In all cases, the research was developed in the laboratory and the results cannot be extrapolated to thermography applied to structures on-site.



**Figura 01.** Imágenes infrarrojas del ensayo a compresión de las probetas de madera (Luong, 1996).  
**Figure 01.** Infrared images of a compression test conducted on wood specimens (Luong, 1996).

### III.1.4. El resistógrafo

El resistógrafo es un equipo que permite evaluar de manera cuasi no destructiva el estado de conservación de elementos de madera. Para ello ejecuta una perforación a velocidad constante con una aguja de 3 mm de diámetro registrando la resistencia que ofrece la madera a la perforación mediante la grabación de la potencia consumida (Figura 02). Esta potencia es interpretada en términos de variación de densidad en esa sección, suponiendo que a mayor densidad mayor será la resistencia al paso de la aguja. El equipo del resistógrafo es portátil por lo que puede ser utilizado para evaluar estructuras en servicio.

### III.1.4. Resistograph

The resistograph is a Quasi Non-Destructive piece of equipment that allows us to assess the state of wood elements. To this end, a  $\varnothing 3$  mm needle drills the wood at a constant speed registering the resistance of the material as a measure of the power consumption. This measurement is interpreted in terms of density variation in the section, supposing that the greater the density the greater the resistance. The resistograph is portable and can be used to assess structures on-site.



a.



b.

**Figura 02.** Resistógrafo (a. Dispositivo de ensayo, b. Impresora que reproduce los datos en tiempo real).  
**Figure 02.** Resistograph (a. Testing device, b. Printer that reproduces real-time data).

El principio del resistógrafo fue inventado en 1985 por dos ingenieros alemanes con el objetivo de analizar el estado de conservación de los postes de madera y árboles. Años más tarde, se sientan los fundamentos físicos de la técnica en una tesis doctoral realizada por Rinn en 1989. Desde entonces, han aparecido varios trabajos, en los que se describe la técnica, se aplica a diferentes especies para estimar su densidad (Ceraldi, 2001, Gantz, 2002, 2004, Fikret Isik y Bailian Li, 2004, Tseng y Hsu, 2004, Lourenco et al., 2007, Dulce Franco, 2011) y se estudia su aplicación para la evaluación de estructuras en edificios (Alvarez et al. 2005, Palaia, 2007).

The principle behind the resistograph was invented by two German engineers in 1985 who wanted to analyze the conservation state of wooden posts and trees. The physical bases of this technique were developed in a PhD thesis in 1989 (Rinn), followed by various works that described the technique when applied to different species to determine density (Ceraldi, 2001, Gantz, 2002, 2004, Fikret Isik & Bailian Li, 2004, Tseng & Hsu, 2004, Lourenco et al., 2007, Dulce Franco, 2011) and to assess building structures (Alvarez et al. 2005, Palaia, 2007).

### III.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA: ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Las técnicas de inspección de estructuras de madera basadas en métodos no destructivos utilizan valores estadísticos

### III.2. DESCRIPTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD: DESTRUCTIVE TESTING

The techniques for inspecting wooden structures based on Non-Destructive methods use statistics values supported by

apoyados en la experimentación para predecir la resistencia residual de una estructura. Esos datos ofrecen una información más o menos aproximada, según la rigurosidad de los ensayos realizados previamente en laboratorio, para poder establecer un diagnóstico sobre el estado de conservación de una estructura de madera.

No obstante, para poder determinar cuantitativamente las capacidades mecánicas reales de una estructura, o determinar en el desarrollo de la fase experimental de laboratorio los valores de resistencia de las probetas de ensayo, es necesario recurrir a ensayos destructivos. Aún así, salvo que estos ensayos sean realizados en condiciones análogas, los resultados obtenidos en cada pieza no podrán ser comparados entre sí. La longitud de las piezas, su canto, el contenido de humedad o la velocidad de la carga aplicada, son algunos de los factores que intervienen directamente en los resultados que se obtienen y que impiden que los valores obtenidos sean comparables.

Para corregir estas diferencias se ha elaborado una base normativa a nivel europeo sobre procedimientos de ensayo en la que se define las variables de cada ensayo y se establecen las correcciones necesarias en cada caso. De este modo los resultados obtenidos bajo unas condiciones particulares son extrapolables a otras situaciones. Esta base normativa está compuesta por las siguientes normas UNE:

- Norma UNE EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- Norma UNE EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- Norma UNE EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.

Norma UNE EN 1912:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

En estas normas se establece que el

experience in predicting the residual strength of a structure. These techniques can yield fairly accurate results, according to the thoroughness of the tests previously conducted in the laboratory, and enable us to diagnose the conservation state of a wooden structure.

*It is destructive testing that is needed in order to quantify the strength parameters of a structure and determine the strength values in samples in the final laboratory phase. Yet although these tests are carried out in similar conditions, the results for each piece cannot be compared to others. The length of the pieces, their thickness, moisture content or speed of the load applied are factors that relate directly to the results and make it impossible to compare the values obtained.*

*In order to eliminate these differences, the bases of a European standard on testing procedure have been established which determines the variables and necessary corrections in each case so that the results extracted under specific conditions can be extrapolated to other situations. These bases consist of the following UNE standards:*

- *UNE EN 408:2011. Wooden structures. Sawed and glued laminated timber. Determining physical and mechanical properties.*
- *UNE EN 384:2010. Structural wood. Determining characteristic values of mechanical properties and density.*
- *UNE EN 338:2010. Structural wood. Strength grading.*

*UNE EN 1912:2010. Structural wood. Strength grading. Determining visual quality and species.*

*These standards stipulate that the*

procedimiento para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de la madera se realice a partir de probetas de tamaño estructural. Se considera la madera como material heterogéneo que presenta singularidades y defectos. No obstante, hasta finales de la década de los 70 del siglo pasado el estudio de la madera era realizado a través de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Los métodos de cálculo seguían el formato de las tensiones admisibles del material al que se aplicaban una serie de ajustes por duración de la carga, humedad, altura de la sección, calidad y coeficiente de seguridad global.

A partir de los 70 este procedimiento se pone en cuestión como sistema válido para predecir el comportamiento estructural de la madera. En 1972 Madsen realizó un estudio experimental donde analiza el diferente planteamiento de la investigación con probetas pequeñas y libres de defectos frente a la madera de tamaño estructural, así como la influencia de la metodología de ensayo desarrollada en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos de estos trabajos demostraron que la resistencia de la madera depende, entre otros factores, del tamaño de la pieza. Esta particularidad del material, conocida por "efecto de tamaño", supone una complicación añadida al proceso de caracterización y de cálculo de la madera, si se compara con otros materiales. Por tanto, el empleo de pequeñas probetas, con la fibra recta y libres de defectos debe reservarse fundamentalmente para el estudio científico de la madera producida por el árbol. En el estudio de las piezas de tamaño estructural se refleja el comportamiento real del material en su aplicación constructiva.

El "efecto de tamaño" ha sido estudiado en la madera desde la segunda década del siglo pasado (Newlin y Trayer, 1924, Dawley y Youngquist, 1947). En el año 2006, el Código Técnico de la Edificación establece una corrección de la resistencia característica a flexión y a tracción con respecto a una pieza de referencia de canto 150 mm:

$$K_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2} < 1,3$$

siendo  $h$  el canto real de pieza.

*procedure to calculate the physical and mechanical properties of wood must use full-sized test specimens. Wood is considered to be a heterogeneous material with singularities and defects, however, until the late 1970s tests were carried out on small wood specimens that were free of defects. Calculation methods were based on the material's admissible tensile strength adjusted for load, moisture, section height, quality and global safety coefficient.*

*This procedure has long been questioned as a valid system for predicting the structural behavior of wood. Madsen developed experimental research that compared the test procedures for small defect-free specimens, with those for full-size specimens, as well as analyzing the methodology developed to obtain those results.*

*The results demonstrated that wood strength depends on, among other factors, the size of the piece. Known as the "size effect", this further complicates the process of characterization of wood as opposed to other materials. As a consequence, the use of small, straight-grain, defect-free specimens should be restricted to scientific studies of wood from trees. Full-size test specimens can be used to test the behavior of the material during the construction process.*

*This "size effect" has been studied since the 1920s (Newlin & Trayer, 1924, Dawley & Youngquist, 1947). In 2006, the CTE state regulation modified characteristic bending and tensile strengths for a reference piece of 150 mm thickness:*

$$K_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2} < 1,3$$

*where  $h$  represents the thickness of the piece.*



Este factor es aplicable a las especies pino silvestre (*Pinus sylvestris* L), laricio (*Pinus nigra* Arnold), insignis (*Pinus radiata* D. Don) y pinaster (*Pinus Pinaster* Ait).

This factor can be applied to Scots pine (*Pinus sylvestris* L), Corsican pine (*Pinus nigra* Arnold), Monterey pine (*Pinus radiata* D. Don) and Maritime pine (*Pinus Pinaster* Ait).

Según el CTE (Código Técnico de la Edificación) la resistencia a flexión disminuye al aumentar las dimensiones de la pieza.

In accordance with the CTE state regulation, if the size of the piece increases, its bending strength decreases.

### III.3. SOLUCIONES DE CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS FORJADOS DE MADERA: VIGAS Y VIGUETAS

### III.3. SOLUTIONS FOR CONSOLIDATING OR REINFORCING STRUCTURAL ELEMENTS IN WOODEN FLOOR STRUCTURES: BEAMS AND JOINTS

Una vez elaborado un diagnóstico sobre el estado de conservación de un forjado, con frecuencia, es necesario acometer tareas de consolidación o refuerzo.

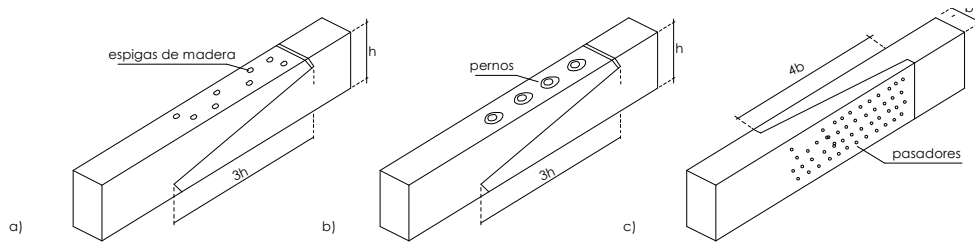
The diagnosis of the conservation state of a structure may then require interventions to consolidate and reinforce that structure.

Actualmente, existen diferentes soluciones de consolidación y/o refuerzo de los elementos estructurales y, dependiendo de la solicitud estructural de la zona dañada del elemento, se acometerán unas soluciones de reparación u otras (Arriaga et al. 2002).

Currently there are various consolidating and/or reinforcing solutions for structural elements, and the solution will depend on the structural requirements of the damaged area in which the element is located (Arriaga et al. 2002).

En la mayoría de los casos el problema de los forjados está relacionado con la degradación biótica de sus apoyos. Para resolverlo se puede recurrir a adosar una línea de carga al muro mediante un elemento metálico, una carrera de madera o una ménsula de hormigón armado. Esta solución disminuye la longitud del elemento dañado y traslada su punto de apoyo. Otras soluciones intervienen directamente sobre el elemento en cuestión y acometen soluciones de refuerzo mediante aporte de material, madera (Mettem et al., 1993 (Figura 03), Landa, 1997) o acero. En ambos casos, uno de los grandes inconvenientes es el impacto visual que produce la reparación en la estructura. Asimismo, en el caso de la solución con aporte de madera, los estudios demuestran una baja eficacia estructural. Por su parte, la solución con acero presenta el inconveniente de la corrosión y baja resistencia al fuego.

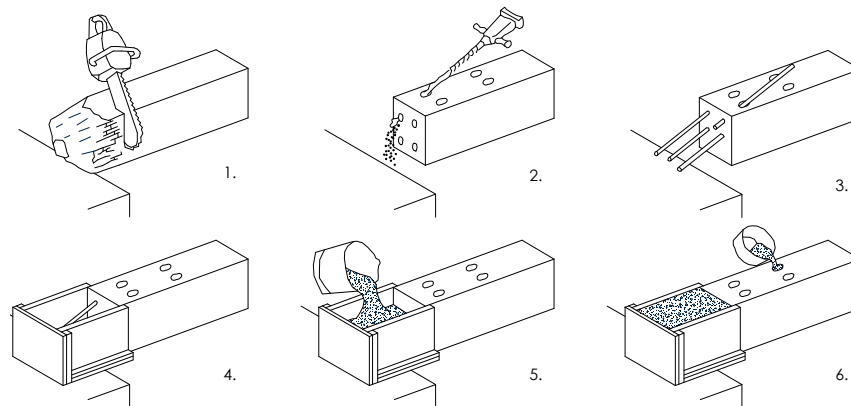
In most cases, the floor structure problems are related to biotic decay in the beam heads embedded in the walls, which can be solved by reinforcing it with a supporting structure made of metal, wood or a reinforced concrete cantilever. This solution reduces the length of the damaged element by altering its support point. Other solutions directly affect the element by reinforcing it with additional material: wood (Mettem et al., 1993 (Figura 03), Landa, 1997) or metal. In both cases, one of the biggest drawbacks is the visual impact of the repair to the structure, and adding wood is often not very efficient, as some studies have demonstrated. The use of metal has disadvantages in terms of corrosion and low fire resistance.



**Figura 03:** Consolidación de vigas con madera (Mettem et. al., 1993.)  
**Figure 03:** Wooden beam consolidation (Mettem et. al., 1993.)

Una solución más reciente es el refuerzo mediante formulación epoxi. Estos refuerzos comenzaron a utilizarse hace unos 40 años. Su principal ventaja es la posibilidad que ofrece para el relleno de cavidades sin presentar problemas de retracción y su adherencia con casi todos los materiales. La solución más representativa de este sistema es la sustitución de la parte dañada de la cabeza de la viga por un mortero de formulación epoxi conectado a la madera sana a través de barras de materiales compuestos. Este procedimiento es objeto de la patente conocida como "Sistema Beta" (Promax, 1982) (Figura 04). El principal inconveniente es su elevado precio debido al coste del mortero epoxi y al gran volumen requerido.

A more recent reinforcement solution has been the application of an epoxy formulation, widely used in other fields for the last 40 years. The main advantages are that it fills cavities without retraction problems and its adherence to almost all materials. The most promising solution is the use of epoxy mortar as substitute for the damaged areas at the head of the beams. Epoxy mortar makes contact with the healthy areas via bars of composed materials, a patented procedure known as the "Beta System" (Promax, 1982) (Figure 04). The main disadvantages are the high cost and the large quantity required.



**Figura 04:** Secuencia de operaciones en consolidación de cabeza de viga mediante sistema Beta (Promax, 1982).  
**Figure 04:** Beta System's sequence of operations in the consolidation of a beam head (Promax, 1982).

Aunque la mayor parte de los problemas en forjados tienen su origen en los empotramientos, en ocasiones el problema afecta a toda la longitud de la viga. Esta situación suele estar relacionada con una sección insuficiente para soportar las cargas con una tensión o deformación admisible, un ataque biótico en el vano de la pieza o roturas debidas a los defectos de la madera.

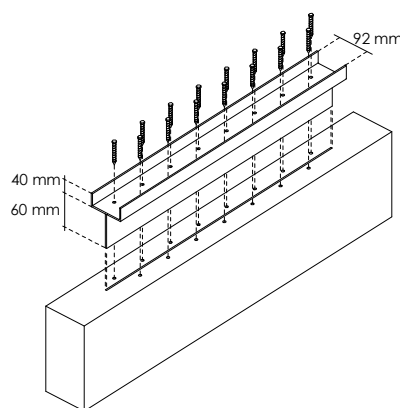
Although the origin of most floor structure problems lies in the embedded part of the beams, on occasions the problem extends to the entire length of the structure. This is often related to a section that cannot support an admissible stress load or deformation, a piece that has suffered biotic attack or fissures due to defects in the wood.

Las soluciones de reparación en estos casos

In such cases, repair solutions consist of

pueden acometerse adosando nuevas piezas, de madera o acero (González Bravo et al., 2010 (Figura 05)), a las originales. La ejecución de esta solución es fácil siempre que no sea necesario abrir nuevos cajeados en el muro. Otra solución que suele emplearse es la colocación de vigas parteluz. Esto provoca el aumento del canto en algunas zonas o la necesidad de introducir apoyos intermedios para la viga parteluz.

attaching wood or metal pieces (González Bravo et al., 2010 (Figure 05)) to the original ones, which is easily done provided there is no need to open wall recesses. Another common solution is to place transversal beams, which increases the framework section in some areas or requires additional intermediate support.



**Figura 05:** Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos en la cara superior (González Bravo et al., 2010)  
**Figure 05:** Reinforcement of wooden beams by metal profiles in the upper sections (González Bravo et al., 2010)

Las soluciones con resinas epoxi consisten en introducir placas o barras de refuerzo internas a modo de armadura (Cigni, 1981). Asimismo, pueden acometerse reconstrucciones de la sección superior de la viga mediante mortero epoxi. Se recurre a unos conectores de barras de poliéster reforzadas con fibra de vidrio que se introducen desde la cara superior de la viga con un pequeño encofrado en los laterales rellenando el volumen con mortero epoxi. Esta solución tiene el inconveniente del elevado gasto de resina en la reparación.

Epoxy resin solutions consist of inserting reinforcing plates or bars to act as a framework (Cigni, 1981). Likewise, the upper sections of the beams can be reconstructed using epoxy mortar. In such cases, polyester bar connectors reinforced by fiberglass are inserted from the upper section with small side-shutterings and an epoxy mortar infill. The drawback of this solution is the resin's high cost.

Los inconvenientes presentados de cada una de las soluciones actuales conllevan a que, con frecuencia, se opte por una sustitución completa del elemento dañado. La baja eficacia estructural de las soluciones con madera o el problema de la corrosión del acero implica que estas soluciones se descarten. En cuanto a las soluciones con formulaciones epoxi, el desconocimiento de su mecanismo estructural y el encarecimiento de su puesta en obra debido a los volúmenes de resina epoxi requeridos conduce a desechar su uso.

However, the inadequacy of these solutions often leads to the replacement of the entire damaged element. The low structural efficiency of the wooden structures or corrosion in steel count against these options, and the insufficient knowledge of the structural mechanism of epoxy resin and its high cost (a large quantity of resin is required in construction) make all these solutions ultimately unsatisfactory.



#### IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para avanzar en el estudio sobre la inspección de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas y alcanzar los objetivos propuestos se ha elaborado un plan experimental. Dicho plan se ha estructurado en diferentes bloques que responden en cada caso a los requerimientos particulares de las técnicas empleadas.

##### IV.1. ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

Mediante los ensayos de termografía de infrarrojos se pretende determinar el alcance de esta técnica en la inspección de estructuras de madera. Se analiza la influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial, la detección de diferentes contenidos de humedad así como la posibilidad de detectar defectos internos.

Las probetas se diseñan específicamente para cada ensayo. Entre ellas es posible distinguir probetas de distintas especies de madera con distintas densidades, probetas con diferentes contenidos de humedad y probetas en las que se tallan huecos de distintas geometrías y situados a profundidades distintas (Figura 06).

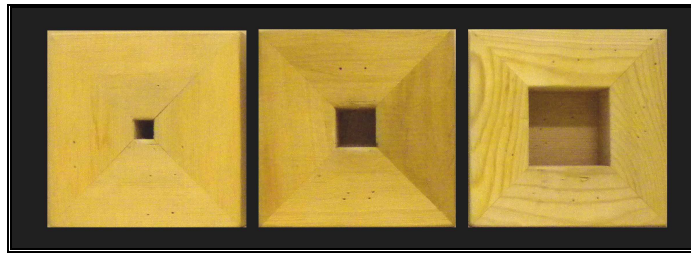
#### IV. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

*In order to advance the research into the inspection of structures using Non-Destructive techniques and fulfill the objectives of this study, an experimental plan has been developed and is now presented in order of the requirements of the methodologies applied in each of the cases and according to the techniques studied.*

##### IV.1. INFRARED THERMOGRAPHY TESTING

*We study infrared thermography to determine the scope of this technique in the inspection of wooden structures. We analyze the influence of wood density on the surface temperature of the wood and the possibility of detecting moisture content and internal defects.*

*The specimens are designed specifically for each test, with various species of different densities, moisture content, and with holes cut in various shapes and sizes (Figure 06).*



**Figura 06.** Probetas con defectos de distintos tamaños situados a una profundidad constante de 5 mm.  
**Figure 06.** Test specimens with defects of different sizes, at a constant depth of 5 mm.

Los ensayos se realizan en procesos de termografía, pasiva y activa:

- *Termografía pasiva:* En esta fase se han tomado imágenes termográficas del conjunto de probetas en cada caso sin aplicar ninguna fuente de estimulación externa. Previamente, se han corregido los valores de emisividad y temperatura ambiente reflejada en el equipo de termografía.
- *Termografía activa:* En esta fase se han estimulado térmicamente cada conjunto de probetas en una estufa. A continuación, se han extraído las muestras de la estufa y se ha llevado a cabo un seguimiento de su proceso de enfriamiento tomando imágenes termográficas del conjunto.

The tests are conducted using thermography processes that are passive and active:

- *Passive thermography:* In this phase thermographic images were taken of the samples with no external stimulation source applied. Previously, the emissivity values and environmental temperatures from the thermography equipment had been corrected.
- *Active thermography:* The samples were thermally stimulated by a heater then removed and examined during the cooling phase, with thermographic images taken of the whole sample.

#### **IV.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS (LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y LA CLASIFICACIÓN VISUAL) PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DE LA MADERA**

La fase experimental de este capítulo tiene como objetivo actualizar las ecuaciones que correlacionan las velocidades de ultrasonidos con parámetros resistentes para la especie de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Asimismo, dada su similitud anatómica con la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold), se pretende obtener las correlaciones para esta especie. Finalmente, se trata de correlacionar los valores resistentes, obtenidos a partir de ensayos mecánicos, con la asignación de clases resistentes de la normativa de clasificación visual.

La muestra de estudio consiste en 3 lotes de probetas madera sana (2 lotes de madera nueva de las especies *Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold y 1 lote de madera vieja

#### **IV.2. DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTING (ULTRASOUND TESTING AND VISUAL GRADING) TO DETERMINE STRENGTH PARAMETERS OF THE WOOD**

The experimental phase presented in this chapter aims to update correlations between the ultrasound transmission speeds and strength parameters of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L), and also for Corsican pine (*Pinus Nigra* Arnold) since this species is very similar anatomically to Scots pine. The strength parameters are correlated by mechanical testing and the strength grade is determined according to visual grading standards.

The studied sample consists of three groups of specimens of healthy wood (two of new *Pinus Sylvestris* L and *Pinus Nigra* Arnold and one of old *Pinus Sylvestris* L). The numbers of

de la especie *Pinus Sylvestris* L) y 1 lote de madera deteriorada de la especie *Pinus Sylvestris* L. El número de piezas de cada lote es el siguiente:

Madera sana	Madera nueva	<i>Pinus Sylvestris</i> L	45 probetas
		<i>Pinus Nigra</i> Arnold	52 probetas
	Madera vieja	<i>Pinus Sylvestris</i> L	37 probetas
Madera deteriorada		<i>Pinus Sylvestris</i> L	60 probetas

Las dimensiones de las probetas de madera sana son 50x50x1000 mm, dimensiones susceptibles de corrección para su asimilación a probetas de tamaño estructural conforme a las nuevas normativas. En cuanto a las dimensiones de las probetas de madera deteriorada éstas son de 20x20x300 mm. La imposibilidad de encontrar piezas con deterioro homogéneo nos llevó a recurrir al uso de pequeñas probetas para desarrollar ese capítulo de la investigación.

El plan experimental de los ensayos se planifica separadamente para los lotes de madera sana y madera deteriorada atendiendo a los objetivos perseguidos en cada caso:

Para las *probetas de madera sana* se realiza una clasificación visual de toda la muestra conforme a las disposiciones de la norma UNE 56544:2007. Asimismo, se realiza una medición de las velocidades de ultrasonidos en las direcciones normal, tangencial y longitudinal a la fibra. Finalmente, se ensaya cada pieza a flexión hasta su rotura según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 408:2011 (Figura 07).

*specimens in each group are:*

Healthy wood	New wood	<i>Pinus Sylvestris</i> L	45 samples
		<i>Pinus Nigra</i> Arnold	52 samples
	Old wood	<i>Pinus Sylvestris</i> L	37 samples
Decayed wood		<i>Pinus Sylvestris</i> L	60 samples

*The size of the specimens of healthy wood is 50x50x1000 mm, which can be corrected in order to compare them to full-sized specimens, in accordance with the new standards. The decayed wood specimens measure 20x20x300 mm, the reduced size due to the lack of pieces with homogeneous decay.*

*The experimental plan for the tests is developed separately for healthy and decayed samples, according to the different objectives in each case:*

*The specimens of healthy wood are visually classified in grades according to the UNE 56544:2007 standard. The ultrasound transmission speeds are measured: normal, tangential and parallel to the fiber. Finally, every specimen is tested for bending strength to breaking point, in accordance with the process described in the UNE EN 408:2011 standard (Figure 07).*

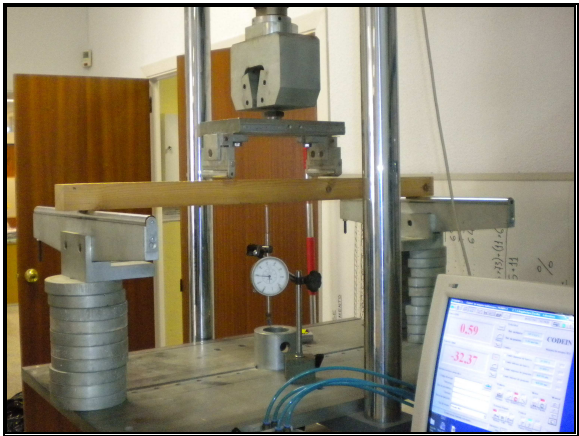


Figura 07. Prensa multiensayo marca Suzpecar y modelo MEM-101/M4.  
Figure 07. The Suzpecar Multitest press brand, model MEM-101/M4.

Los resultados obtenidos en cada ensayo permiten establecer las correlaciones entre los ensayos destructivos y ensayos no destructivos de ultrasonidos (velocidades longitudinales) de forma global para el conjunto de las probetas de cada especie (distinguiendo entre los lotes de madera nueva y vieja) y según las calidades visuales, conforme a los criterios de la norma UNE 56544:2007. Todo ello para su posterior aplicación a la evaluación de las estructuras presentes en las obras de rehabilitación.

▪ Para las probetas de madera deteriorada se realiza una estimación de su pérdida de densidad y la medición de las velocidades de transmisión en las direcciones normal, tangencial y longitudinal a la fibra de las piezas. Finalmente, cada una de las piezas se ensaya a flexión según el procedimiento operatorio de la norma UNE 56537:1979.

Los resultados obtenidos van encaminados a establecer las correlaciones entre las velocidades de ultrasonidos y la pérdida de densidad y la resistencia residual a flexión de las piezas.

### IV.3. ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO

La fase experimental de este capítulo tiene como objetivo la obtención de la densidad de la madera de coníferas (*Pinus*) a partir de los ensayos de resistógrafo. Asimismo, en el caso de la madera deteriorada, el objetivo es determinar la pérdida de densidad producida. Para alcanzar este objetivo, es necesario establecer, previamente, las correlaciones entre la densidad, o la pérdida de densidad, de la madera y las medidas de resistógrafo, RM.

La importancia del conocimiento de la densidad de una madera durante la fase de inspección y diagnóstico radica en que la densidad es una propiedad física de la madera que interviene directamente sobre sus propiedades mecánicas.

La muestra de estudio consiste en 1 lote de piezas de madera sana compuesto por 55 troncos de distintas especies de *Pinus*, de diámetro y altura variables, y 1 lote de madera deteriorada compuesto por 5 vigas procedentes de una obra de rehabilitación.

Los ensayos se planifican en función de los

Based on the results from the tests, correlations between Destructive and Non-Destructive tests can be globally established for the samples of each species and by visual grading by applying the UNE 56544:2007 standard. All this is necessary for the subsequent assessment of structures under restoration.

▪ The specimens of decayed wood are tested to estimate their density loss and measure ultrasound transmission speeds, which are normal, tangential and parallel to the fiber. Finally, every specimen is tested for bending strength in compliance with the UNE 56537:1979 standard.

The results enable us to determine the correlations between ultrasound speeds and density loss, and the residual bending strength of the pieces.

### IV.3. RESISTOGRAPH TESTING

This part of the experiment aims to obtain the density for coniferous species (*Pinus*) by resistograph testing, as well as the density losses in decayed wood. The correlations between wood density, or density loss, and resistograph measurements, RM, were calculated beforehand.

It is important to ascertain the density of a wood element during the inspection and diagnosis phases as density is a physical property of wood which is directly related to its mechanical properties.

The sample studied consists of two groups of specimens, one of healthy wood containing 55 trunks of different *Pinus* species of variable diameter and height. The other group, of decayed wood specimens, is of 5 beams from a structure under restoration.

The tests are planned according to the

objetivos perseguidos en cada caso:

objectives in each case:

Sobre las *probetas de madera sana* se selecciona una sección libre de defectos. En esta sección se realizan 2 perfiles resistográficos ortogonales (Figura 08).

From the *healthy wood specimens* a section free of defects is selected, on which two *resistograph profiles* are carried out orthogonal to each other (Figure 08).



**Figura 08:** Probetas de madera sana (a. Preparación de las probetas para ensayo. b. Secciones de ensayo cortadas tras realizar los perfiles resistográficos).

**Figure 08:** Specimens of healthy wood (a. Preparing the specimens for testing. b. Testing sections following resistograph profiling).

A partir de los perfiles resistográficos ortogonales realizados se obtiene el valor de las medidas de resistógrafo, RM. Los valores de RM son calculados a partir de la energía consumida durante el proceso de perforación de la pieza y cuantificada mediante el área del perfil resistográfico (Figura 09) mediante la siguiente expresión:

The orthogonal resistograph profiles allow RM resistograph measurements to be taken. The value of these RM measurements is calculated according to the power consumed during the drilling process and quantified for the area used in the resistograph profiling (Figure 09), by means of the following expression:

$$RM = \frac{\int \text{Área}}{l}$$

$$RM = \frac{\int \text{Área}}{l}$$

siendo;

where;

RM Consumo medio del equipo por milímetro penetrado.

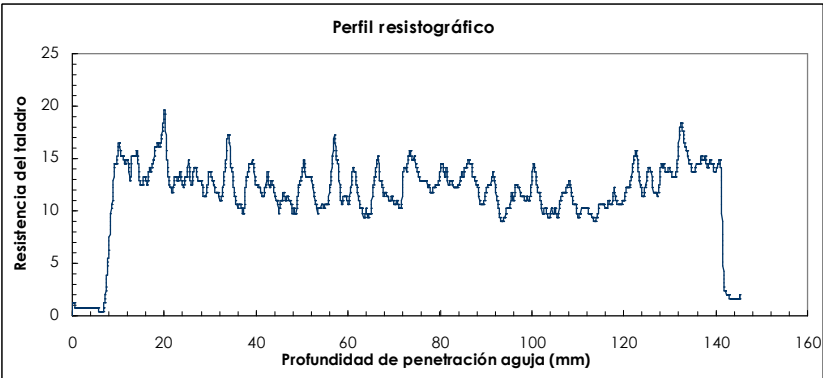
RM Average consumption of the equipment per mm of drilling depth.

$\int \text{Área}$  Integral que representa el área bajo la curva en mm<sup>2</sup>.

$\int \text{Área}$  Integral, representing the area under the curve in mm<sup>2</sup>.

l Longitud total penetrada en mm.

l Drilling depth in mm.



**Figura 09:** Perfil resistográfico obtenido en una de las probetas. El valor de RM se calcula la integral del área por unidad de longitud penetrada.

**Figure 09:** Resistograph profile obtained with one of the specimens. The RM value is quantified by calculating the area under the curve per unit of drilling depth.



Una vez obtenido el valor de RM de los 2 perfiles resistográficos de cada sección, se obtiene la densidad de cada sección completa de ensayo representadas en la Figura 09.b. mediante el procedimiento operatorio descrito en la norma ASTM D2395-07ae1 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials).

Los resultados obtenidos en los ensayos permiten establecer las correlaciones entre la densidad de la madera,  $d$ , y las medidas de resistógrafo, RM. El valor de las medidas de resistógrafo, RM, es obtenido como el valor medio de los 2 perfiles resistográficos realizados en cada sección.

En una segunda fase, se determinan unas correlaciones complementarias entre la densidad de la madera,  $d$ , y las medidas de resistógrafo, RM. El objetivo es mejorar la correlación obtenida logrando un mayor coeficiente de ajuste de la regresión.

Para ello, se procede a la extracción de una pequeña muestra de 7 mm de diámetro en las proximidades de la sección ensayada y siguiendo la dirección de uno de los perfiles resistográficos (Figura 10).

Once the RM values have been obtained from both resistograph profiles of each section, the densities can be calculated, as shown in Figure 08.b, by means of a process described in ASTM D2395-07ae1 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials).

The results from the tests enable us to establish the correlations between wood density,  $d$ , and resistograph measurements, RM. The RM value is the mean of the two resistograph profiles of each section.

In a second phase, complementary correlations are determined between wood density,  $d$ , and resistograph measurements, RM to improve the correlation obtained by a higher regression coefficient adjustment.

To this end, a sample of  $\varnothing$  7 mm is taken from an area close to the tested section following the direction of one of the resistograph profiles (Figure 10).



**Figura 10:** Pequeñas probetas extraídas en una de las direcciones de los perfiles resistográficos realizados en cada sección.

**Figure 10:** Small samples taken following the direction of one of the resistograph profiles of each section.

A partir de estas pequeñas probetas se establecen 2 correlaciones paralelas entre la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo:

- Considerando unas probetas de 7 mm de diámetro y longitud variable en cada caso.
- Considerando las probetas de 7 mm de diámetro anteriores y reduciendo su longitud hasta 20 mm.

From these samples two parallel correlations between wood density and resistograph values are determined:

- Considering  $\varnothing$  7 mm specimens of variable length.
- Considering the same  $\varnothing$  7 mm specimens but reducing their length to 20 mm.

En ambos casos, la densidad de las probetas se obtiene mediante la relación

In both cases, density is obtained by means of the relation between the mass and

entre la masa y el volumen de las mismas. Asimismo, las medidas de resistógrafo, RM, son obtenidas como la integral del área bajo la curva del tramo del perfil resistográfico correspondiente a la longitud de la probeta en la dirección de la extracción.

Los resultados de estos ensayos permiten establecer las correlaciones entre la densidad de la madera,  $d$ , y las medidas de resistógrafo, RM, en cada caso.

A partir de estos resultados desarrolla una metodología de aplicación a obras de rehabilitación para determinar la densidad de los elementos que constituyen las estructuras de madera en servicio.

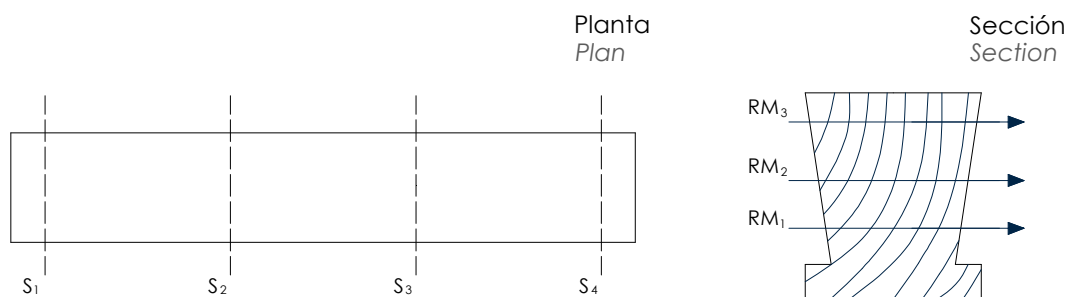
Sobre las vigas de madera deteriorada extraídas de la obra de rehabilitación se seleccionan 4 secciones en las que se realizan ensayos de resistógrafo y medidas de velocidad de ultrasonidos en la dirección perpendicular a la fibra (velocidades normales) en 3 alturas distintas (Figura 11).

volume of the pieces. Likewise, RM resistograph measurements are obtained from the area under the curve of the resistograph profile corresponding to the specimen's length in the direction of extraction.

The results of these tests yield the correlations between wood density,  $d$ , and the resistograph measurements, RM, in each case.

Based on these results, a methodology is developed to be applied to buildings under restoration in order to determine the density of the elements in the structures.

From the decayed wood beams taken from the structure under restoration, four sections are selected and tested by resistograph and ultrasound waves (ultrasound speeds normal to the fibers) at three different heights (Figure 11).



**Figura 11:** a. Secciones de ensayo de las vigas de madera deteriorada, b. Alturas de ensayo en cada sección.  
**Figure 11:** a. Tested sections of decayed wood beams, b. Tested heights of each section.

En cada una de estas secciones se realizan ensayos de resistógrafo y medición de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la dirección de la fibra de las piezas (velocidades normales).

Cada medición de resistógrafo proporciona un valor de RM obtenido como el área bajo la curva del perfil resistográfico. Asimismo, la pérdida de densidad de cada sección y altura de ensayo se determina a través de las medidas de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la fibra (velocidades normales). Para ello se emplean las correlaciones obtenidas en el apartado anterior entre la pérdida de densidad y las medidas de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la fibra.

Each section undergoes resistograph testing, and ultrasound transmission speeds are measured, normal to the fibers.

Each resistograph measurement provides an RM value from the area under the curve of the resistograph profile. Likewise, the density loss of each section and the height tested are determined via normal ultrasound transmission speeds. This is done by using the previously obtained correlations between the density loss and the normal ultrasound transmission speeds.

Los resultados obtenidos en los ensayos permiten establecer las correlaciones entre la pérdida de densidad de la madera,  $\Delta d$ , o la resistencia residual de rotura a flexión de las piezas, y las medidas de resistógrafo, RM.

The results from the tests enable the correlations to be made between density loss,  $\Delta d$ , residual bending strength and resistograph measurements, RM.

#### IV.4. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO

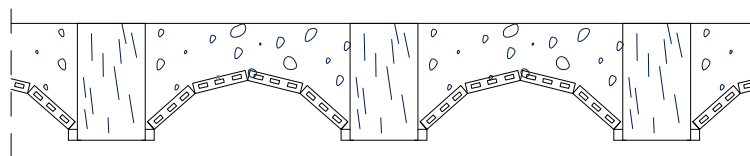
La aplicación de las técnicas de inspección estudiadas en el presente trabajo de investigación a la morfología constructiva de los forjados de entrevigado cuajado lleva a desarrollar una metodología de inspección aplicable a este campo de inspección.

Los forjados de entrevigado cuajado se caracterizan por tener relleno todo el entrevigado (Figura 12). Esta configuración constructiva permite mejorar las condiciones de aislamiento y la protección contra el fuego de la estructura pero propicia el deterioro por pudrición de sus vigas de madera. La humedad, procedente de las instalaciones del edificio o filtraciones, queda retenida en el material de relleno y provoca el deterioro por pudrición de las vigas.

#### IV.4. DEVELOPING AN INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH INFILL BETWEEN BEAMS

To apply the inspection techniques studied in the present work to floor structures with infill between beams requires a specific inspection methodology.

The infill between the beams of floor structures is present in all the beam voids (Figure 12), which improves insulation and protection against fire. However, it leads to decay in wooden beams, and water, possibly from the building's plumbing system or seepage, can penetrate the infill material causing deterioration.



**Figura 12:** Morfología constructiva de los forjados de entrevigado cuajado.  
**Figure 12:** Construction morphology of the floor structures with infill between beams.

La morfología constructiva de estos forjados limita sus labores de inspección y diagnóstico e impide la aplicación de las metodologías de inspección mediante ultrasonidos desarrolladas por, entre otros, este Grupo de Investigación para la inspección de forjados<sup>1</sup>. Estas metodologías requieren el acceso por las 2 caras laterales de las vigas debiendo quedar éstas al descubierto. En esta situación, el procedimiento operatorio del resistógrafo se perfila como una técnica viable que permite aportar información

The construction morphology of these floor structures limits inspection and diagnosis, and prevents the adequate application of inspection methodologies by ultrasound, as carried out by this Investigation Group and others, to inspect floor structures<sup>1</sup>. These methodologies require access to both sides of the beam, which cannot be done if they are hidden. The resistograph is a viable tool for this type of situation as it provides information on the conservation state of the interior of the beam as part of a floor

<sup>1</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

<sup>1</sup> Rubio de Hita, P. "Assessment of wood conditions based on ultrasound techniques". University of Sevilla. School of Architecture. Doctoral thesis (1997).



sobre el estado de conservación del interior de las vigas de estos forjados. Sin embargo, la información dada por el resistógrafo es puntual y no es, por tanto, extrapolable a la pieza completa.

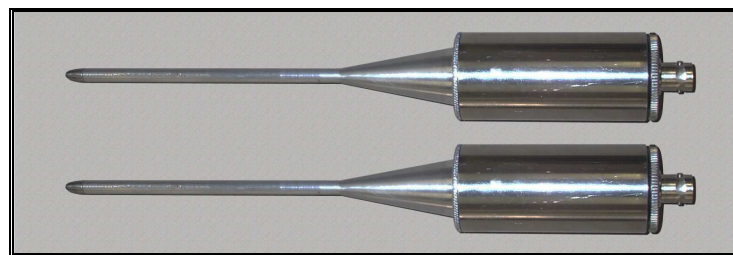
*structure, but these data are task-specific and cannot be extrapolated to the whole piece.*

Como resultado se plantea la necesidad de una metodología para la inspección de estos forjados mediante técnicas de inspección que nos ofrezcan lecturas globales de las piezas. Así, el análisis de la técnica de ultrasonidos y el procedimiento operatorio del resistógrafo nos lleva a plantear un dispositivo en el que se aúnen ambas técnicas y ofrezcan una respuesta a este campo de inspección.

*As a result, a methodology for inspecting these floor structures is needed which provides complete information on the piece studied. Our analysis of the ultrasound technique and the resistograph procedure has led us join both techniques as a solution to enable an accurate inspect of wooden floor structures.*

Con todo ello, se ha desarrollado un nuevo palpador de ultrasonidos (Figura 13). Este palpador, mediante la práctica de un orificio en la viga, permite realizar mediciones de velocidad de ultrasonidos en el interior de las piezas y aportar información sobre su estado de conservación.

*A new ultrasound transducer was (Figure 13) which uses a drill to measure ultrasound speeds inside the beam and so provide information about its conservation state.*



**Figura 13.** Nuevo dispositivo de ultrasonidos desarrollado.  
**Figure 13.** New ultrasound transducer.

Una vez obtenido este nuevo dispositivo se ha planteado un plan de ensayos en laboratorio con 2 objetivos fundamentales:

*The new device was developed and a programme devised for testing it in the laboratory with two main objectives:*

1º) Verificar el funcionamiento del nuevo dispositivo.

*1º) Verify the performance of the new device.*

2º) Correlacionar los resultados obtenidos con este nuevo palpador con los resultados obtenidos con el palpador tradicional estableciendo los parámetros correctores para su aplicación.

*2º) Correlate the results obtained with the new transducer to those with the traditional device, establishing the correction parameters for its application.*

De este modo, se ha planteado una campaña de mediciones en el interior y exterior de las vigas:

*The following measurements were proposed:*

- *Mediciones exteriores:* El objetivo es obtener la correlación entre el palpador de ultrasonidos tradicional y el nuevo dispositivo teniendo como

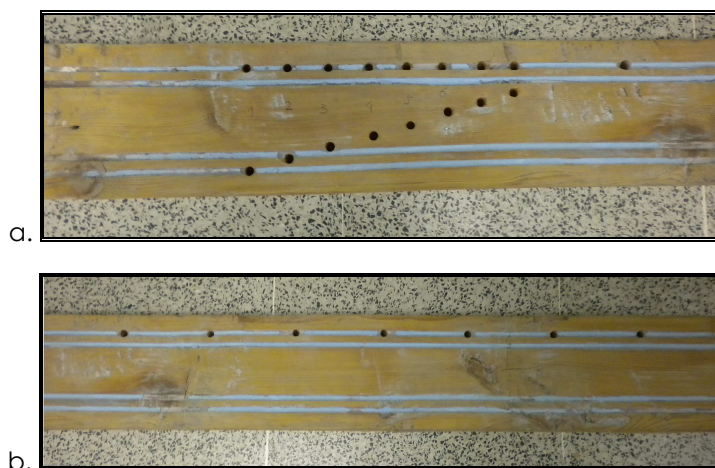
- *External measurements:* The objective is to obtain the correlation between the traditional ultrasound transducer and the new device with a single point of

único punto de contacto con las piezas a inspeccionar la punta de los transductores.

- *Mediciones interiores:* Una vez verificado el funcionamiento del nuevo dispositivo, se trata de determinar si se producen distorsiones en las mediciones al producirse el contacto del fuste del nuevo palpador con la madera (Figura 14).

*contact with the beams: the transducer heads.*

- *Internal measurements:* Once the performance of the new device is verified, the aim is to determine if the measurements are distorted because of the contact between the transducer's shaft and the wood (Figure 14).



**Figura 14.** Viga taladrada para las mediciones interiores con el nuevo palpador (a. Mediciones perpendiculares a la dirección de la fibra de la pieza, b. Mediciones longitudinales a la dirección de la fibra).

**Figure 14.** Drilled beam for internal measurements using the new transducer (a. Measurements normal to the fibers, b. Measurements longitudinal to the fibers).

#### IV.5. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS

Tras el proceso de inspección, el objetivo es aproximarnos a una solución para la reparación y/o refuerzo de vigas de madera. Se pretende obtener una solución que cumpla las exigencias de eficacia estructural, facilidad de ejecución, durabilidad, compatibilidad con la madera, economía, integración estética y buen comportamiento al fuego. Asimismo, se persigue una solución constructiva viable tanto para el refuerzo de cabezas, deterioradas por ataques de hongos e insectos xilófagos, como para el refuerzo de vanos, necesario por agotamiento del material o cambios de uso.

El estudio de las soluciones actuales pone de manifiesto la necesidad de aportar un sistema alternativo a las soluciones de reparación y/o refuerzo mediante perfiles metálicos (problemas de corrosión y resistencia al fuego) o a base de madera

#### IV.5. DEVELOPING A SYSTEM FOR BEAM REPAIR AND/OR REINFORCEMENT

After the inspection process, the objective is to find a solution to enable the repair and/or reinforcement of wooden beams. The solution must be structurally efficient, easy to construct, durable, wood-compatible, economic, aesthetically integrated and have good fire resistance. Likewise, the solution needs to provide viable reinforcement of the beam heads, in a possible state of decay due to fungi or xylophagous insects, as well as reinforcement of the space between supports which may result from material fatigue or changes in the use of the building.

The study of solutions currently in use highlight the need for an alternative system to reinforcement and/or repair by metal (due to corrosion and low resistance to fire) or, by wood (low structural efficiency). Reinforcement with composite materials

(baja eficacia estructural). En este sentido, los refuerzos compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi) se presentan como una alternativa posible. No obstante, la falta de información sobre su funcionamiento provoca inseguridad en su aplicación. Así, desde el presente trabajo se propone iniciar un estudio que sienta las bases sobre su comportamiento estructural.

(fiberglass and epoxy resin) are a possible alternative yet the lack of information on their behavior undermines their reliability. So, the research work in this study aims to provide information on their structural behavior.

Se procede a la fabricación de una placa de refuerzo con los siguientes materiales: corcho (empleado como base de trabajo), fibra de vidrio (empleado como material con alta resistencia a tracción) y resina de poliéster (empleada como material ligante) (Figura 15). La unión de la placa con la madera se realiza mediante resina epoxi bicomponente.

The manufacture of a reinforcing plate initially consists of the following materials: cork (material base), fiberglass (material with high tensile strength) and polyester resin (binding material) (Figure 15). To join the plate to the wood an epoxy resin bicomponent is used.



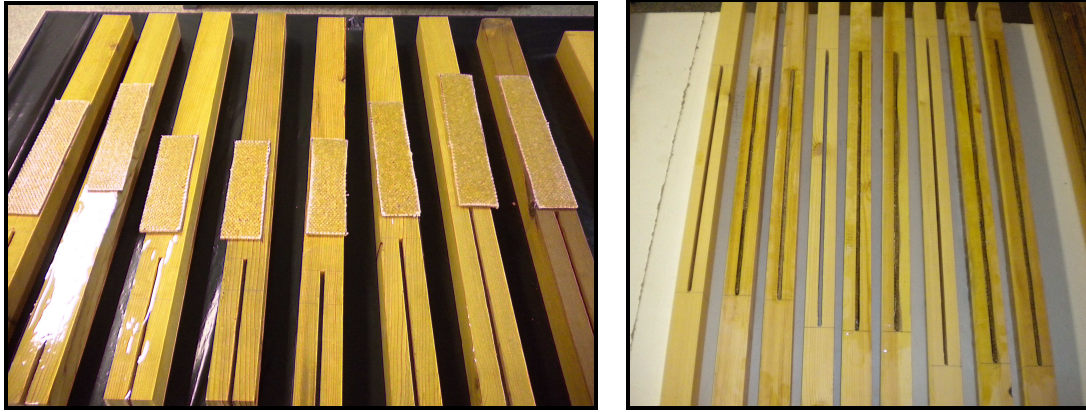
**Figura 15.** Proceso de fabricación y corte de la placa de refuerzo.  
**Figure 15.** Manufacture process and cutting of the reinforcing plate.

Una vez preparada la placa se procede a elaborar un plan de ensayos para verificar el comportamiento estructural de la placa bajo las solicitaciones de cortante y flexión.

Once the plate is ready, we run a test to verify the structural behavior of the plate under shear and bending forces.

La muestra de estudio consiste en 2 lotes de probetas que se preparan para ensayos de cortante y flexión, respectivamente (Figura 16). El lote de probetas para ensayar a cortante se ha compuesto de 18 probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y 13 probetas de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) de dimensiones 50x50x725 mm. Los ensayos de flexión se han realizado sobre 10 probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y dimensiones 45x45x900 mm y 5 probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y dimensiones 50x50x1000 mm.

The study sample consists of 2 groups of specimens prepared for shear and bending strength testing, respectively (Figure 16). The shear test sample has 18 specimens of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L) and 13 of Corsican pine (*Pinus Nigra* Arnold), measuring 50x50x725 mm. The bending test has 10 specimens of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L), measuring 45x45x900 mm, and 5 of Corsican pine (*Pinus Nigra* Arnold), measuring 50x50x1000 mm.



**Figura 16.** Preparación de las vigas de refuerzo (a. Probetas para ensayo a cortante, b. Probetas para ensayo a flexión).

*Figure 16.* Preparing the reinforcing beams (a. Shear test specimens, b. Bending test specimens).

Sobre las probetas preparadas se han realizado ensayos de cortante siguiendo el procedimiento de la norma UNE EN 1168:2005 y ensayos de rotura a flexión según el procedimiento operatorio descrito en la norma UNE EN 408:2011.

*Shear tests were conducted on the specimens according to the procedure described in the UNE EN 1168:2005 standard, and bending tests in compliance with the UNE EN 408:2011 standard.*



## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se exponen los resultados más relevantes que se han obtenido:

### V.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

#### V.1.1. Ensayos realizados en laboratorio:

El plan experimental de ensayos de termografía realizado en laboratorio ha permitido establecer que existe una relación entre la densidad de la madera y su temperatura superficial. Como consecuencia, ha sido posible localizar, a partir de ensayos de termografía, defectos y/o singularidades superficiales, como nudos y fendas.

Por otro lado, ha sido posible detectar zonas con un distinto contenido de humedad debido a la alteración de las propiedades térmicas del material producida por el agua.

Respecto a la localización de defectos internos en la madera, los ensayos han revelado que:

- Si los defectos internos están secos y no se aplica ninguna fuente de estimulación térmica no es posible detectar ningún defecto, independientemente de su tamaño y/o profundidad.
- Si los defectos internos están secos y se aplica una fuente de estimulación es posible detectarlos aunque con limitaciones en cuanto a tamaño

## V. DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS

The most relevant results are presented below:

### V.1. RESULTS FROM INFRARED THERMOGRAPHY TESTS

#### V.1.1. Tests conducted in the laboratory:

The experimental plan for thermography tests conducted in the laboratory confirmed that wood density is related to its surface temperature. As a consequence, thermography testing enabled us to locate superficial defects and/or singularities such as knots and fissures.

Areas with different moisture content were also detected, as the material's thermal properties altered under the influence of water.

Regarding detection of internal defects, the tests showed that:

- If the internal defects are dry and no thermal stimulation is used, they cannot be detected, no matter their size and/or depth.
- If the internal defects are dry and thermal stimulation is used, they can be detected if they measure 40x40 mm to a depth of 15 mm and a minimum

mínimo y profundidad máxima. Los ensayos revelan que es posible detectar defectos con un tamaño de 40x40 mm cuando éstos se sitúan a profundidades de hasta 15 mm. Asimismo, para una profundidad dada de 5 mm es posible detectar defectos con un tamaño mínimo de 20x20 mm.

- Si los defectos internos están húmedos y se aplica una fuente de estimulación térmica, las diferencias térmicas entre las zonas sanas y las zonas defectuosas se acentúan debido a la alteración que produce el agua en las propiedades térmicas de la madera. En este caso es posible detectar defectos de hasta un tamaño de 10x10 mm.

*piece measuring 20x20 mm can be identified at 5 mm.*

- *If the internal defects are wet and thermal stimulation is used, the thermal differences between healthy and damaged areas increase due to the alteration of the wood's thermal properties by water. In such a case, defects can be detected up to 10x10 mm in size.*

#### **V.1.2. Aplicación in situ de la técnica:**

En cuanto al empleo de la termografía de infrarrojos en la inspección in situ, las tareas de inspección de forjados y cubiertas de madera han permitido extraer las siguientes conclusiones (Anejos 01-04):

- En la inspección de cubiertas de madera, el soleamiento natural favorece su aplicación actuando como fuente de estimulación térmica. Este aporte de calor facilita la localización de defectos superficiales. Sin embargo, resulta insuficiente para la detección de defectos internos.
- En el caso de la inspección de forjados de planta es necesario montar un dispositivo de ensayo para estimular térmicamente la madera.

En ambos casos, los resultados obtenidos han permitido localizar los focos de humedad existentes. Asimismo, para localizar defectos superficiales, (nudos y fendas) dado su escaso tamaño, ha sido necesario conseguir un nivel de aproximación aceptable (1-2 m) a la estructura a inspeccionar, dependiendo de la resolución del equipo empleado.

Con todo ello, es posible concluir que la termografía de infrarrojos es una técnica que presenta limitaciones para la inspección in situ de estructuras de madera. Sin embargo, resulta indudable es que una técnica útil y eficaz para la detección de humedades sin necesidad de acceder directamente al elemento a inspeccionar. Este hecho

#### **V.1.2. On-site tests:**

*Regarding infrared thermography conducted on-site, the following conclusions are drawn from the inspection of wooden floor structures and roofs (Appendix 01-04):*

- *The inspection of wooden roofs is made easier by sunlight as a natural stimulating source, which facilitates the location of defects on the surface, but it is insufficient to detect internal faults.*
- *The inspection of intermediate floor structures calls for a thermal stimulation device.*

*In both cases, the results allowed us locate the water focal points. Regarding the detection of superficial defects (knots and fissures), their small size obliged us to get closer to the structure (1-2 m), depending on the equipment used.*

*The conclusion we reached was that infrared thermography is a limited tool for inspecting wooden structures on-site. However, it is a useful and effective technique for detecting moisture content and does not require direct access to the element under inspection. This is important for the inspection of wooden structures where the presence of water is*

adquiere una especial relevancia para la inspección de estructuras de madera en las que los focos de humedad son síntomas de un deterioro o de un inicio del mismo.

*symptomatic of decay or initial deterioration.*

## **V.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS (LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y LA CLASIFICACIÓN VISUAL) PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES**

## **V.2. RESULTS FROM DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE TESTS (ULTRASOUND TESTING AND VISUAL GRADING) TO DETERMINE WOOD STRENGTH PARAMETERS**

### **V.2.1. Ensayos realizados sobre madera sana:**

### **V.2.1. Tests conducted on healthy wood:**

Los ensayos no destructivos realizados sobre madera sana han arrojado los siguientes resultados:

*The results from Non-Destructive Testing (NDT) on healthy wood yielded the following conclusions:*

Los ensayos de determinación de la densidad revela que la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es un 20% más densa que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

*Tests to determine wood density show that Corsican pine (Pinus Nigra Arnold) is 20% denser than Scots pine (Pinus Sylvestris L).*

El rendimiento clasificatorio de una población obtenido a partir de los criterios de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007 es menor que las clasificaciones realizadas a partir de parámetros resistentes (resistencia a flexión o módulo de elasticidad estático).

*Grading performance of a population according to visual criteria in the UNE 56544:2007 standard is lower than the classifications carried out according to parameters such as bending strength and static modulus of elasticity.*

Los ultrasonidos permiten estimar las capacidades mecánicas de la madera (resistencia a flexión y módulo de elasticidad). Así, para la madera sana debe emplearse la velocidad longitudinal de ultrasonidos como variable predictora. Las velocidades normales o tangenciales ofrecen lecturas puntuales sin proporcionar una información global del elemento en estudio. Sin embargo, los coeficientes de correlación obtenidos entre las velocidades de ultrasonidos y los parámetros resistentes no son muy elevados. Estas correlaciones mejoran al combinar las velocidades de transmisión de un elemento con su densidad a través del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d = V_l^2 \cdot d$ ).

*Ultrasound waves are used to obtain the mechanical properties of wood (bending strength and static modulus of elasticity). In the case of healthy wood, longitudinal speed must be the predicting variable. Normal or tangential speeds provide specific but not global information. However, the correlation coefficients between ultrasound speeds and the strength parameters obtained are not very high. These correlations improve when combining transmission speeds and the density of an element using dynamic modulus of elasticity ( $E_d = V_l^2 \cdot d$ ).*

- Correlaciones globales para la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L):

MOR = 0,0212 VI – 53,131	R <sup>2</sup> = 0,41
MOE = 3,8296 VI – 8844,1	R <sup>2</sup> = 0,48
MOR = 0,0055 MOE – 8,4856	R <sup>2</sup> = 0,69
MOR = 0,0046 E <sub>d</sub> – 12,439	R <sup>2</sup> = 0,68
MOE = 0,8295 E <sub>d</sub> – 774,68	R <sup>2</sup> = 0,90

- Global correlations for Scots pine (*Pinus Sylvestris* L):

MOR = 0.0212 VI – 53.131	R <sup>2</sup> = 0.41
MOE = 3.8296 VI – 8844.1	R <sup>2</sup> = 0.48
MOR = 0.0055 MOE – 8.4856	R <sup>2</sup> = 0.69
MOR = 0.0046 E <sub>d</sub> – 12.439	R <sup>2</sup> = 0.68
MOE = 0.8295 E <sub>d</sub> – 774.68	R <sup>2</sup> = 0.90

- Correlaciones para la calidad ME-1<sup>2</sup> para la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold):

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= 0,0076 \text{ VI} + 28,786 & R^2 &= 0,40 \\ \text{MOE} &= 4,3454 \text{ VI} - 9997,5 & R^2 &= 0,85 \\ \text{MOR} &= 0,0047 \text{ MOE} + 2,3529 & R^2 &= 0,53 \\ \text{MOR} &= 0,0015 \text{ E}_d + 44,225 & R^2 &= 0,50 \\ \text{MOE} &= 0,6982 \text{ E}_d + 721,38 & R^2 &= 0,87 \end{aligned}$$

Siendo en cada caso;

MOR Resistencia a flexión en N/mm<sup>2</sup>  
 MOE Módulo de elasticidad estático en N/mm<sup>2</sup>  
 VI Velocidad longitudinal de ultrasonidos en m/s  
 E<sub>d</sub> Módulo de elasticidad dinámico en N/mm<sup>2</sup>

- Correlations for Corsican pine (*Pinus Nigra* Arn.), grade ME-1<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= 0.0076 \text{ VI} + 28.786 & R^2 &= 0.40 \\ \text{MOE} &= 4.3454 \text{ VI} - 9997.5 & R^2 &= 0.85 \\ \text{MOR} &= 0.0047 \text{ MOE} + 2.3529 & R^2 &= 0.53 \\ \text{MOR} &= 0.0015 \text{ E}_d + 44.225 & R^2 &= 0.50 \\ \text{MOE} &= 0.6982 \text{ E}_d + 721.38 & R^2 &= 0.87 \end{aligned}$$

in which;

MOR Bending strength N/mm<sup>2</sup>  
 MOE Static modulus of elasticity N/mm<sup>2</sup>  
 VI Longitudinal ultrasound speed m/s  
 E<sub>d</sub> Dynamic modulus of elasticity N/mm<sup>2</sup>

Las correlaciones obtenidas entre la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad (MOE) arrojan unos coeficientes de correlación (R<sup>2</sup>) más interesantes que los obtenidos entre la velocidad longitudinal y el módulo de rotura (MOR). Tanto el módulo de elasticidad (MOE) como la velocidad longitudinal de ultrasonidos aportan información global de la pieza mientras que el módulo de rotura (MOR) puede deberse a un defecto local que no tiene influencia dominante sobre la velocidad.

Al deducir los parámetros resistentes mediante estas ecuaciones para la madera calidad ME-1 de ambas especies, se obtienen unas características mecánicas muy distintas. De estos resultados se deduce que ambas correlaciones no pueden usarse indistintamente pues la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es más resistente que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). De este modo se recomienda que, si no se realiza una identificación anatómica de la especie, se aplicarán las correlaciones obtenidas para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) quedando del lado de la seguridad.

Asimismo, los resultados revelan que las velocidades de ultrasonidos están afectadas por varios factores: tipo de madera, densidad, humedad, posición de la fibra y distancia entre los transductores de los equipos. Como consecuencia los resultados obtenidos de las mediciones de ultrasonidos deben ser corregidos de acuerdo a estos

Correlations between longitudinal speed and modulus of elasticity (MOE) provide more interesting correlation coefficients (R<sup>2</sup>) than those obtained between longitudinal speed and bending strength (MOR). Both modulus of elasticity (MOE) and longitudinal speed provide global information about the piece while the result for bending strength (MOR) may be due to a local defect which has no influence on speed.

Strength parameters determined by these equations applied to ME-1 quality wood of both species provide very different mechanical properties. From these results we deduce that the correlations cannot be used without differentiating between them as Corsican pine (*Pinus Nigra* Arnold) is stronger than Scots pine (*Pinus Sylvestris* L). So, if the species cannot be identified, we recommend using the correlations for Scots pine (*Pinus Sylvestris* L) which are always more reliable.

The results show that ultrasound speeds are affected by factors that include type of wood, density, moisture content, fiber position and distance between the ultrasound transducers. As a consequence, the ultrasound measurements need to be corrected according to these criteria. The present work provides correlations for

<sup>2</sup> Todas las probetas de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) analizadas son de calidad ME-1.

<sup>2</sup> All the analyzed specimens of Corsican pine (*Pinus Nigra* Arnold) are ME-1 grade.



criterios. En el presente trabajo se han deducido las correcciones necesarias para la aplicación a la madera de pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*)<sup>3</sup>.

- Corrección de humedad (humedad de referencia 12%) para valores inferiores a 28%:

$$V_{N12} = 15,89 (H_1 - 12) + V_1$$

siendo;

$V_{N12}$  Velocidad normal corregida (referida al 12% de humedad)

$V_1$  Velocidad normal a una humedad  $H$

$$V_{L12} = 32,698 (H_1 - 12) + V_1$$

siendo;

$V_{L12}$  Velocidad longitudinal al 12% de humedad

$V_1$  Velocidad longitudinal a una humedad  $H_1$

- Corrección por distancia entre transductores:

$$V_N = 25,726 (D_1 - 45) + V_{N1}$$

siendo;

$D_1$  Separación entre transductores (<45 mm)  
 $V_{N1}$  Velocidad normal para una separación  $D_1$

Se ha demostrado que la velocidad longitudinal de ultrasonidos media de un lote disminuye al bajar la calidad del lote. Por el contrario, las velocidades normales varían aleatoriamente por lo que no pueden utilizarse como variables predictoras.

Valores medios de velocidad (m/s)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (nueva)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (vieja)
Calidad ME-1	4985,66	5536,17
Calidad ME-2	4870,00	5387,10
Calidad RECHAZO	4555,03	5238,89

El rango de velocidades ultrasonidos y, por tanto, las relaciones entre las mismas es similar para las 2 especies estudiadas, con un margen de diferencia muy pequeño. Por tanto, se deduce que no es posible

Corsican pine (*Pinus Nigra Arnold*)<sup>3</sup>.

- Correction for moisture content (reference value 12%) for values lower than 28%:

$$V_{N12} = 15,89 (H_1 - 12) + V_1$$

in which;

$V_{N12}$  Normal corrected speed (moisture content 12%)

$V$  Normal speed (actual moisture content  $H$ )

$$V_{L12} = 32,698 (H_1 - 12) + V_1$$

in which

$V_{L12}$  Longitudinal speed (moisture content 12%)

$V_1$  Longitudinal speed (actual moisture content  $H_1$ )

- Correction for distance between transducers:

$$V_N = 25,726 (D_1 - 45) + V_{N1}$$

in which;

$D_1$  Distance between transducers (<45 mm)  
 $V_{N1}$  Normal speed for distance  $D_1$

It was proved that the lower the wood quality the lower the average longitudinal ultrasound speed. However, normal speeds vary substantially so they cannot be considered as predicting variables.

Average speed values (m/s)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (new)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (old)
ME-1 quality	4985,66	5536,17
ME-2 quality	4870,00	5387,10
Rejected	4555,03	5238,89

Ultrasound speed ranges are very similar in both species, so ultrasound does not offer reliable criteria for differentiating elements in these species.

<sup>3</sup> En trabajos de investigación precedentes de este Grupo de Investigación (Rubio de Hita, 1997) se han estimado las correlaciones necesarias para la corrección de las velocidades de ultrasonidos en la madera de *Pinus sylvestris* L.

<sup>3</sup> Previous research by this Investigation Group (Rubio de Hita, 1997) estimates the necessary correlations to correct ultrasound transmission speeds through *Pinus sylvestris* L.

establecer un criterio fiable que permita, a partir de una medición con ultrasonidos, discriminar entre elementos de ambas especies.

	Velocidades ultrasonidos medias (m/s)		
	Longitudinal	Normal	Tangencial
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	4866,03	1825,79	1257,68
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	4570,91	1972,93	1552,44

	Relación entre velocidades		
	VI/Vn	VI/Vt	Vn/Vt
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	2,69	3,92	1,46
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	2,34	3,02	1,29

	Average speed values (m/s)		
	Longitudinal	Normal	Tangential
Scots pine ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	4866,03	1825,79	1257,68
Corsican pine ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	4570,91	1972,93	1552,44

	Relation between speeds		
	VI/Vn	VI/Vt	Vn/Vt
Scots pine ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	2,69	3,92	1,46
Corsican pine ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	2,34	3,02	1,29

Asimismo, los resultados de los ensayos destructivos realizados sobre madera sana han permitido establecer:

- En una especie de madera, en este caso pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), la madera si se conserva sana mantiene sus propiedades resistentes (resistencia a flexión y módulo de elasticidad) a lo largo del tiempo.
- Si se emplean como variables clasificatorias los resultados de los ensayos mecánicos (resistencia a flexión o módulo de elasticidad), con independencia de las calidades visuales de las piezas, el rendimiento clasificatorio de las probetas de un lote mejora sustancialmente. Estos resultados demuestran el carácter conservador de la norma de clasificación visual.

Likewise, the results from Destructive tests on healthy wood proffer the following conclusions:

- Any type of wood, as in the case of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L), as long as it remains healthy, retains its strength properties (bending strength and modulus of elasticity) over time.
- If MOR or MOE are used as classifying variables regardless of the specimens' visual quality, then classification is substantially enhanced, proving that the current standard for visual grading is somewhat cautious.

#### V.2.2. Ensayos realizados sobre madera deteriorada:

Los ensayos no destructivos realizados sobre madera deteriorada han revelado que existe una relación entre la pérdida de densidad de una sección de un elemento de madera y su velocidad normal de ultrasonidos.

Para determinar esta pérdida de densidad para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se ha propuesto la siguiente ecuación:

#### V.2.2. Tests conducted on decayed wood:

Non-Destructive tests show that the loss of density in a wood element is related to the normal ultrasound speed that passes through it.

In order to determine this density loss in Scots pine (*Pinus Sylvestris* L), the following equation is proposed:

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N$$

$$R^2 = 0,81$$

siendo,

$V_N$  Velocidad normal del elemento estudiado en m/s  
 $\Delta d$  Porcentaje de pérdida de densidad (%) de dicho elemento

Estos resultados han permitido fijar 3 intervalos de diagnóstico:

- $V_N > 1200$  m/s  $\rightarrow$  Madera sana.
- $1200$  m/s  $> V_N > 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera con inicio de deterioro, pérdida de densidad entre 0-30%.
- $V_N < 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad superior al 30%.

Asimismo, se ha fijado un criterio complementario de diagnóstico atendiendo a una bajada de velocidad normal ( $V_N$ ) relativa en un elemento. Se toma como referencia el valor de velocidad normal en madera sana en una sección del elemento estudiado:

- Bajada  $V_N$  0%: Madera sana.
- Bajada  $V_N$  entre 0 y 50%: Madera con inicio de deterioro, pérdida de densidad entre 0-30%.
- Bajada  $V_N$  superior al 50%: Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$ .

Por su parte, los ensayos destructivos realizados sobre madera deteriorada han manifestado que existe una relación entre la velocidad normal de ultrasonidos de un elemento de madera deteriorado (condicionada por su pérdida de densidad) y su resistencia residual de rotura en flexión.

Para determinar la resistencia residual en flexión de un elemento de madera deteriorado se ha propuesto la siguiente ecuación:

$$MOR = 0,0502 V_N - 18,259$$

$$R^2 = 0,65$$

siendo;

$MOR$  Tensión de rotura en flexión en N/mm<sup>2</sup>  
 $V_N$  Velocidad normal de ultrasonidos en m/s

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N$$

$$R^2 = 0,81$$

in which,

$V_N$  Normal speeds in the element studied m/s  
 $\Delta d$  Density loss percentage (%)

Three diagnosis intervals have been established for these results:

- $V_N > 1200$  m/s  $\rightarrow$  Healthy wood.
- $1200$  m/s  $> V_N > 600$  m/s  $\rightarrow$  Slightly decayed wood (initial phase). Density loss between 0-30%.
- $V_N < 600$  m/s  $\rightarrow$  Decayed wood. Density loss  $> 30\%$ .

Likewise complementary diagnosis criteria have been determined for a decrease in relative normal speeds in the element ( $V_N$ ). The reference value corresponds to normal speed in a section of the element studied, in the case of healthy wood:

- $V_N$  decrease 0%: Healthy wood.
- $V_N$  decrease between 0 and 50%: Slightly decayed wood (initial phase). Density loss between 0-30%.
- $V_N$  decrease more than 50%: Decayed wood. Density loss  $> 30\%$ .

On the other hand, Destructive tests on decayed wood proved the existing relation between the normal ultrasound speed of a decayed wood element (conditioned by its density loss) and its residual bending strength.

Residual strength of decayed pieces of wood can be determined by the following equation:

$$MOR = 0,0502 V_N - 18,259$$

$$R^2 = 0,65$$

In which;

$MOR$  Bending strength N/mm<sup>2</sup>  
 $V_N$  Normal ultrasound speed m/s

**V.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

**V.3. RESULTS FROM RESISTOGRAPH TESTS TO OBTAIN PHYSICAL PROPERTIES OF WOOD (DENSITY AND DENSITY LOSS)**

**V.3.1. Ensayos realizados sobre madera sana:**

**V.3.1. Tests conducted on healthy wood:**

Los ensayos resistográficos sobre madera sana han arrojado los siguientes resultados:

*The results from resistograph testing on healthy wood yielded the following conclusions:*

Existe una relación entre la densidad de la madera de la especie *Pinus* y las medidas realizadas con resistógrafo. De este modo, para determinar la densidad de un elemento de madera en función de las medidas de resistógrafo se han propuesto las siguientes correlaciones:

*The density of the Pinus species is related to the resistograph test results. So, the following correlations are proposed to determine the density of a wooden element according to the resistograph measurements:*

- Correlación obtenida a partir de troncos de madera sana (considerando el valor medio de los 2 perfiles resistográficos, RM, de la sección y la densidad global de dicha sección):

- *Correlation based on healthy wood trunks (considering the mean value of the two resistograph profiles, RM, and the global density of the section):*

$d = 18,046 \text{ RM} + 236,96 \quad R^2 = 0,58$

$d = 18,046 \text{ RM} + 236,96 \quad R^2 = 0,58$

- Correlaciones obtenidas a partir de pequeñas probetas obtenidas (considerando el valor medio de 1 perfil resistográfico, RM, de la sección y la densidad obtenida a partir de la extracción de 1 pequeña muestra en las proximidades del perfil):

- *Correlation based on small specimens (considering the mean value of one of the resistograph profiles, RM, and the density of a small sample near the section studied):*

Pequeñas probetas de longitud variable

*Small specimens, variable length*

$d = 24,535 \text{ RM} + 210,34 \quad R^2 = 0,70$   
 $d = 23,804 \text{ RM}' + 217,23 \quad R^2 = 0,71$

$d = 24,535 \text{ RM} + 210,34 \quad R^2 = 0,70$   
 $d = 23,804 \text{ RM}' + 217,23 \quad R^2 = 0,71$

Pequeñas probetas de 20 mm de longitud

*Small specimens 20 mm long*

$d = 28,117 \text{ RM} + 146,6 \quad R^2 = 0,68$   
 $d = 26,056 \text{ RM}' + 159,73 \quad R^2 = 0,75$

$d = 28,117 \text{ RM} + 146,6 \quad R^2 = 0,68$   
 $d = 26,056 \text{ RM}' + 159,73 \quad R^2 = 0,75$

siendo en cada caso;

*in which;*

d      Densidad del elemento de madera en Kg/m<sup>3</sup>  
RM    Área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada

d      *Density of the wood element Kg/m<sup>3</sup>*  
RM    *Total area under the resistograph curve per penetrating length unit*

RM'      Área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada descontando el primer tramo del perfil resistográfico coincidente con el desplazamiento de la aguja hasta penetrar en la madera

RM'      Total area under the resistograph curve per penetrating length unit passing over the first part of the resistograph profile that coincides with the movement of the needle until it penetrates the wood

Con estos resultados se propone una metodología de aplicación in situ que permite calibrar estas correlaciones para su aplicación a cada caso particular.

Based on these results, an on-site methodology is proposed to determine the application of these correlations in each particular case.

**V.3.2. Ensayos realizados sobre madera deteriorada:**

**V.3.2. Tests conducted on decayed wood:**

Los ensayos realizados con resistógrafo sobre madera deteriorada han mostrado que existe una relación entre la pérdida de densidad de la madera y las medidas realizadas con resistógrafo. De este modo, los ensayos realizados mediante resistógrafo permiten localizar la sección donde se ha producido el deterioro y cuantificar su pérdida de densidad.

The results from resistograph testing on decayed wood showed the relation between density loss and resistograph measurements. So, resistograph tests can identify decayed sections and quantify their loss of density.

$\Delta d = 69,364 - 6,8352 \text{ RM} \qquad R^2 = 0,5015$

$\Delta d = 69,364 - 6,8352 \text{ RM} \qquad R^2 = 0,5015$

siendo;

in which;

$\Delta d$       Densidad del elemento de madera en Kg/m<sup>3</sup>  
RM      Área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.

$\Delta d$       Density of the wood element Kg/m<sup>3</sup>  
RM      Total area under the resistograph curve per penetrating unit length

**V.4. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO**

**V.4. RESULTS OF THE INSPECTION METHODOLOGY FOR FLOOR STRUCTURES WITH INFILL BETWEEN BEAMS**

La metodología desarrollada para la inspección de los forjados de entrevigado cuajado está basada en el uso del nuevo instrumental elaborado. Los ensayos realizados con este nuevo transductor han arrojado los siguientes resultados:

The methodology developed to inspect floor structures with infill between beams is based on the use of the new transducers, tests on which produced the following results:

Las mediciones exteriores realizadas con el nuevo palpador han apuntado a un retardo medio de 60,8 µs con respecto al valor de tiempo obtenido con el palpador tradicional.

External measurements made with the new transducers have an average retardation of 60.8 µs when compared to values obtained with traditional transducers.

Las mediciones interiores han revelado que no existen diferencias significativas en los tiempos de transmisión ultrasónicos en esta nueva configuración de ensayo, es decir, introduciendo los palpadores en el interior de las vigas. Como resultado, se deduce que pueden despreciarse los efectos de transmisión por fuste.

Internal measurements show that there are no significant differences in terms ultrasound transmission times when inserting the transducers into the beam. As a result, , we can state that transmissions through shafts do not need to be taken into account.

Por otro lado, debido a las oscilaciones que pueden producirse en las mediciones, debe limitarse el ancho mínimo de la viga susceptible de inspección mediante esta técnica. La variabilidad producida en las mediciones tiene un mayor efecto sobre las piezas de pequeña escuadría pudiendo ser interpretada como una pérdida de densidad. Por esta razón, se limita la aplicabilidad de la técnica a vigas con una escuadría igual o superior a 12 cm. La inspección de vigas de menor escuadría se reserva para otros métodos de inspección como puede ser el resistógrafo.

Se han establecido unos criterios de diagnóstico de velocidades perpendiculares a la fibra (normales) en función de la separación entre los transductores. Estos criterios vienen expresados en intervalos de tiempo de transmisión de la onda ultrasónica para cada estadio de deterioro.

Como ejemplo, para una separación entre transductores de 6 cm los intervalos establecidos son los siguientes:

Madera sana	Madera con inicio de deterioro: pérdida de densidad 0-30%	Madera deteriorada: pérdida de densidad >30%
< 110,8 $\mu$ s	110,8 – 160,8 $\mu$ s	> 160,8 $\mu$ s

Teniendo en cuenta estas premisas se ha elaborado una metodología de inspección para los forjados de entrevigado cuajado. Esta metodología se encuentra actualmente en proceso de desarrollo. No obstante, los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio pronostican un avance favorable para su aplicación in situ en obras de rehabilitación. No obstante, deben señalarse las limitaciones que ofrece hoy día la técnica derivada de la morfología de los equipos empleados:

- Diámetro de perforación elevado. El diámetro necesario para albergar los transductores de ultrasonidos es 0,6 cm.
- Oscilación en las mediciones. Aunque se consiguen mediciones estables debe mejorarse el acople o estudiar un método de aislamiento del fuste para facilitar su aplicación en obra.

Con todo ello, debe concluirse que en un futuro debe trabajarse en el perfeccionamiento de los equipos

Furthermore, the minimum width to be inspected has to be established due to the likely variations between measurements. Variability in a measurement has a greater effect on small pieces and can be related to density loss. Thus, the use of this technique is limited to beams with a minimum size of 12 cm. Smaller sections have to be inspected using devices such as the resistograph.

New diagnosis criteria for speeds normal to the fibers are stated according to distances between transducers. These criteria are expressed in the transmission time intervals of the ultrasound wave for each stage of decay.

For instance, the times intervals for a 6 cm distance between transducers are the following:

Healthy wood	Slightly decayed wood: density loss between 0-30%	Decayed wood: density loss >30%
< 110,8 $\mu$ s	110,8 – 160,8 $\mu$ s	> 160,8 $\mu$ s

Given these premises, a new methodology is proposed for inspecting floor structures with infill between beams, which is currently under development. The laboratory results have brought forward its on-site application to restoration works, however, this technique is still limited by the morphology of the equipment used:

- Large diameter drilling. The required diameter for inserting ultrasound transducers is 0.6 cm.
- Oscillations in the measurements. Although it is possible to obtain stable values, the insulation of the transducer shaft needs to be improved in order to make this technique easier to use.

In conclusion, more work is needed to improve the equipment, and drilling diameters need to be reduced so that this



empleados. Es fundamental conseguir disminuir el diámetro de perforación de modo que pueda considerarse una metodología de inspección cuasi no destructiva.

*approach can be classified as a Non-Destructive Technique.*

#### **V.5. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS**

#### **V.5. RESULTS OF THE SYSTEM FOR BEAM REPAIR AND/OR REINFORCEMENT**

Se ha iniciado la elaboración de un sistema para la reparación y/o el refuerzo de vigas. Los resultados obtenidos sobre probetas reforzadas mediante este sistema sientan las bases de futuras investigaciones. Estos resultados han permitido concluir:

*A system to repair and/or reinforce beams is being developed and the results from testing reinforced specimens using this system provide the basis for future research. These results lead us to conclude that:*

- Los refuerzos realizados a partir de placas realizadas con fibra de vidrio y resina de poliéster han alcanzado una eficacia estructural en las probetas reparadas próxima o superior a la unidad por lo que se muestran como una buena alternativa a las reparaciones y/o refuerzos realizados con perfiles de acero o madera.

- *Reinforcement to restored specimens with fiberglass and polyester resin makes them equally or more structurally efficient than healthy ones, and hence good reinforcement alternatives to steel profiles or wood beams.*

- Es necesario hacer un estudio sobre la longitud de anclaje y refuerzo necesaria de la placa para conseguir un máximo aprovechamiento. La experiencia práctica de los ensayos realizados ha arrojado las siguientes conclusiones:

- *The necessary anchorage length must be studied to make the best use of reinforcements. The following conclusion are drawn based on testing:*

- Ensayos de cortante: Para las probetas ensayadas (con una escuadría de 50 mm y una longitud de 725 mm), la longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2h (100 mm). Esta longitud está referida al punto de aplicación de la carga en el ensayo.

- *Shear testing: for the specimens tested (a 50 mm square section 725 mm in length), the most efficient anchorage was found to be 2h (100 mm) from the loading point.*

- Ensayos de flexión: Para las probetas ensayadas a flexión (escuadría de 45x45x900 mm y 50x50x1000 mm), la longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2.2h (100 mm). Esta longitud debe aplicarse a ambos lados de los puntos de aplicación de la carga en el ensayo de flexión realizado con 2 puntos de carga.

- *Bending testing: for the specimens tested (sections measuring 45x45x900 mm and 50x50x1000 mm), the most efficient anchorage was 2.2h (100 mm) from the loading point to both ends of the beam.*

Ambos ensayos no corresponden a situaciones de carga reales. No obstante, los diagramas de esfuerzos derivados del procedimiento operatorio de estos

*Both tests are based on hypothetical loading conditions, and the strength diagrams for both are always less favorable than those obtained in real situations.*

ensayos son más desfavorables que los diagramas resultantes de una situación real.

- El estudio económico de la solución ha revelado una importante reducción de su coste de ejecución (un 50% aproximadamente) frente al actual sistema Beta, ampliamente extendido en el campo de la reparación de forjados de madera. La causa fundamental del abaratamiento de esta solución frente al Sistema Beta reside en el empleo de una prótesis de madera, de similares características a la madera usada en la estructura, en sustitución del relleno de mortero epoxi.

*A financial study showed that this solution reduces construction costs by approximately 50% with respect to the Beta System currently used to repair wooden floor structures, mainly because a wood prosthesis whose characteristics are similar to the structural wood is used instead of the epoxy mortar infill.*



**COROLARIO**

Tal y como se planteaba en la introducción del trabajo, se ha aportado un estudio que permite acotar y actualizar el uso de las técnicas no destructivas o cuasi no destructivas (termografía de infrarrojos, mediciones de transmisión de ondas ultrasónicas y resistógrafo) para la inspección de forjados y estructuras de madera.

Asimismo, se ha desarrollado un instrumental y se ha aportado una metodología para la aplicación de la técnica de ultrasonidos a la inspección de la tipología de forjados de entrevigado cuajado.

De cualquier forma este trabajo está implícito en una línea de investigación que debe seguir desarrollándose. Para ello se ha iniciado el estudio de una técnica complementaria de refuerzo mediante placas fabricadas a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Este sistema sienta las bases de investigaciones futuras encaminadas a desarrollar un proceso de industrialización del sistema que permita su abaratamiento y puesta en obra.

**COROLLARY**

*As stated in the introduction to the present work, this research refines and updates the use of Non-Destructive or Quasi Non-Destructive techniques (infrared thermography, ultrasound wave transmission and resistograph) for the inspection of wooden structures and floor structures.*

*New instruments have been developed as well as the methodology to apply the infrared thermography technique to the inspection of floor structures with infill between beams.*

*This work forms part of a line of research that is developing a complementary reinforcement technique by means of plates made from fiberglass and polyester resin. This study is the basis of future research that aims to industrialize a process that will reduce future construction costs.*



## **CAPÍTULO I.**

# **CONSIDERACIONES PREVIAS**



La elección del tema del presente trabajo de investigación responde a varias consideraciones previas:

- Es un tema que queda enmarcado dentro de la línea de estudio iniciada por el Grupo de Investigación TEP-205: "Análisis y evaluación de sistemas constructivos y Estructurales en la Arquitectura". Este trabajo supone la continuación de las investigaciones precedentes recogidas, entre otros, en los siguientes documentos:

- Rubio de Hita, P. "*Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos*". Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

- Rodríguez Liñán, C, Rubio de Hita, P. "*Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos*". Sevilla. Universidad de Sevilla (2000). 165 págs. ISBN: 8447206572.

Mediante estos trabajos se iniciaron los estudios sobre la inspección no destructiva de estructuras de madera, fundamentalmente forjados. Estas investigaciones se centran en el uso de la técnica de ultrasonidos para evaluar el estado de conservación y/o deterioro de las estructuras de madera en servicio en las obras de rehabilitación.

- Sus conclusiones y resultados son de aplicación directa, no solo para la clasificación estructural de materiales, sino para el campo profesional de los técnicos (arquitectos, ingenieros,...). Este trabajo pretende facilitar la labor de estos profesionales cuando se enfrentan a la peritación o diagnosis de un edificio existente, y tiene la necesidad de tener un conocimiento objetivo de la realidad del edificio y de su estado de conservación para la toma de decisiones en cuanto a la sustitución o la reparación de elementos de madera aumentando la fiabilidad del cálculo estructural.



## **CAPÍTULO II.**

# **INTRODUCCIÓN**





La madera es un material que, por su trabajabilidad y propiedades mecánicas, ha sido muy utilizada en la construcción a lo largo de la historia como elemento estructural. No obstante, debido a su naturaleza biológica, sus propiedades físicas y mecánicas pueden verse alteradas por distintos factores. Patologías de origen biótico como los hongos xilófagos, los insectos de ciclo larvario o los insectos sociales (termitas) asociadas a un incremento de humedad pueden degradar su estructura provocando una pérdida de densidad y un descenso de su resistencia.

Esta situación ha creado una imagen de obsolescencia e ineficiencia sobre la madera que ha provocado su rechazo como material estructural. Sin embargo, en los últimos años, gracias a una nueva conciencia social en la que se unen los conceptos de sostenibilidad y patrimonio, esta valoración ha ido cambiando. Se ha desarrollado un interés creciente por la recuperación y preservación del patrimonio arquitectónico, en el que, con frecuencia, las estructuras de madera toman un papel protagonista.

De este modo, cuando nos enfrentamos a un proyecto de rehabilitación o restauración arquitectónica de un edificio existente, surge la necesidad de contar con herramientas y métodos de inspección que permitan obtener un conocimiento objetivo de la realidad del edificio y de su estado de conservación. El desconocimiento o la falta de información pueden conducir a establecer un diagnóstico erróneo y desembocar en un proyecto de actuación poco acertado.

Referido al estudio y diagnóstico de las estructuras de madera, forjados y cubiertas, la aparición del Código Técnico de la Edificación (CTE) integra por primera vez a la madera como material estructural ofreciendo las mismas garantías de calidad y seguridad estructural que otros materiales estructurales como el acero o el hormigón. Esta nueva situación implica la necesidad de implantar un sistema para la caracterización de la madera y sus productos derivados de forma que se garanticen sus propiedades mecánicas. En la actualidad las metodologías de inspección, reconocidas y reguladas por una base normativa, basan su estudio en la tradicional clasificación visual de los elementos y en la asignación de clases resistentes.

La aplicación de estos procedimientos a una estructura existente resulta muy limitada generando que la inspección de una estructura, fundamentada en la medición de los defectos y singularidades del material, sea un proceso lento y esté sujeto a la subjetividad y experiencia del operario que la ejecute. Asimismo, en los casos de degradación biológica del material, la inspección visual resulta insuficiente para diagnosticar la magnitud y extensión del deterioro producido así como para estimar el comportamiento estructural y la resistencia residual de la estructura bajo estas nuevas condiciones. Estas circunstancias han provocado que en las últimas décadas se hayan desarrollado líneas de investigación que han insistido en el estudio de nuevas herramientas y métodos de evaluación no destructivos que apoyen y complementen las tareas de inspección y diagnóstico de estas estructuras mejorando la predicción de sus propiedades mecánicas.

En este contexto, surge el Grupo de Investigación TEP-205: "Análisis y evaluación de sistemas constructivos y Estructurales en la Arquitectura". Este Grupo inicia sus trabajos en el estudio de técnicas no destructivas para la inspección de estructuras de madera, fundamentalmente forjados. Sus primeras investigaciones se centran en el uso de la técnica de ultrasonidos para evaluar el estado de conservación y/o deterioro de las estructuras de madera en servicio en las obras de rehabilitación.

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de estudio iniciada por el Grupo teniendo en cuenta los cambios normativos y pretende avanzar en esta área de conocimiento para dotar a los técnicos de nuevas herramientas y/o métodos que le permitan inspeccionar y diagnosticar con fiabilidad las estructuras de madera presentes en los edificios a rehabilitar.



## **CAPÍTULO III.**

# **OBJETIVOS. HIPÓTESIS DE PARTIDA**

**III.1. OBJETIVOS PRIORITARIOS**

**III.2. OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS**

**III.3. OBJETIVOS PARCIALES**



Desde el presente trabajo de investigación se pretende avanzar en el **campo de la inspección no destructiva de estructuras de madera** para dotar a los técnicos de nuevas herramientas y/o métodos que le permitan inspeccionar y diagnosticar con fiabilidad las estructuras de madera presentes en los edificios a rehabilitar. Así, entre los objetivos perseguidos en este trabajo se plantean los siguientes **OBJETIVOS PRIORITARIOS**:

1. **Desarrollar nuevos métodos/herramientas de inspección no destructivos o cuasi no destructivos complementarios a los ya existentes.** Para ello se plantea:
  - Estudio de las posibilidades de la termografía de infrarrojos como técnica complementaria de inspección no destructiva.
  - Estudio de las posibilidades del resistógrafo como técnica cuasi no destructiva para la estimación de la densidad y la pérdida de densidad de la madera.
  - Desarrollo de un método de inspección y análisis mediante la técnica de ultrasonidos para su aplicación a los forjados de entrevigado cuajado.
2. **Actualizar los métodos de inspección empleados hasta el momento.**
  - Revisión de las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con parámetros resistentes (resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad estático (MOE)) a partir de probetas de tamaño estructural según la nueva normativa de obligado cumplimiento. Correlación de los resultados obtenidos con los resultados aportados por la clasificación visual.

Paralelamente al desarrollo de estos trabajos se define un **OBJETIVO COMPLEMENTARIO**:

1. **Discriminación de las especies de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) estableciendo las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos con los parámetros resistentes (resistencia de rotura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)) en cada caso, a partir de probetas de tamaño estructural. Asimismo, se propone correlacionar los resultados obtenidos con los resultados aportados por la clasificación visual.**

Y una serie de **OBJETIVOS PARCIALES**:

1. **Realizar el estudio de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) a partir de pequeñas probetas.**
2. **Comparar los resultados obtenidos con pequeñas probetas en investigaciones precedentes de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con los resultados obtenidos con probetas de tamaño estructural.**
3. **Comparar los resultados obtenidos en esta investigación con pequeñas probetas para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) con los resultados obtenidos con probetas de tamaño estructural.**

Por otro lado, referido a la **fase de intervención sobre una estructura de madera tras realizar las labores de inspección y diagnóstico**, este trabajo pretende avanzar en el desarrollo de un sistema para la reparación y/o el refuerzo de elementos estructurales de madera de los forjados: vigas o viguetas. De esta forma se define un **OBJETIVO COMPLEMENTARIO:**

1. **Sentar las bases de un estudio para obtener una solución de reparación y/o refuerzo de vigas de madera** que cumpla las exigencias de eficacia estructural, facilidad de ejecución, durabilidad, compatibilidad con la madera, economía, integración estética y buen comportamiento al fuego. Se persigue el desarrollo de una solución constructiva viable tanto para el refuerzo de cabezas, deterioradas por el ataque de hongos e insectos xilófagos, como para el refuerzo de las piezas en los centros de vano, necesario por el agotamiento del material o cambios de uso.



## **III.1. OBJETIVOS PRIORITARIOS**

---



Desde la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación en el que se incluye la madera como material estructural, equiparándose con otros materiales usados en estructuras, surge la necesidad de desarrollar herramientas que complementen los métodos de clasificación utilizados hasta el momento con el objetivo de garantizar la calidad del material en el mercado.

Actualmente, el método de clasificación normalizado en España está basado en la clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural a través de las normas UNE 56544 (para coníferas) y 56546 (para frondosas). Estas normas están acreditadas por los Comités Europeos de Normalización ya que la metodología de clasificación visual está ampliamente extendida e implantada en Europa y en aquellos países con una sobrada tradición en construcción en madera<sup>1</sup>.

Para la clasificación mecánica se ha elaborado una base normativa a nivel europeo donde se desarrollan los procedimientos de ensayo destructivos a emplear en cada caso y se parametrizan cada uno de los factores intervinientes. De este modo, a partir de los resultados obtenidos de los ensayos definidos en la norma UNE EN 408 se determinan, mediante la norma UNE EN 384, los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad que permiten asignar una de las clases resistentes definidas en la norma UNE EN 338. Asimismo, el enfoque globalizador del actual mercado queda reflejado en la norma UNE EN 1912 en la que se realiza una intercomparación de un número determinado de calidades visuales de especies con una clase resistente en función de su procedencia.

La metodología de clasificación visual está orientada a la clasificación de la madera nueva en aserraderos. Su aplicación para la evaluación de la madera de edificios ya existentes presenta serias limitaciones lo que origina la necesidad de generar un enfoque particular para la inspección y evaluación de la madera presente en los edificios a rehabilitar. En este contexto existen numerosos trabajos en los que tratan de complementar la clasificación visual de una madera con otras técnicas de ensayos no destructivos que puedan resultar más efectivas, como los ultrasonidos o el análisis de vibraciones inducidas.

En esta línea de estudio se encuentran los trabajos desarrollados por este Grupo de Investigación<sup>2</sup>. En estos trabajos se desarrolló una metodología de inspección para edificios mediante la aplicación de la técnica de ultrasonidos. Esta metodología está basada en 2 principios fundamentales:

- Para estructuras en buen estado de conservación: La estimación de la capacidad resistente de los elementos de madera que trabajan a flexión (vigas y pares de forjados y cubiertas) a través de las velocidades de transmisión de ultrasonidos longitudinales a la fibra. Esta estimación se realiza mediante valores estadísticos obtenidos en ensayos de laboratorio en los que se correlaciona las medidas de velocidad de ultrasonidos longitudinales a la fibra con parámetros resistentes.
- Para estructuras deterioradas: La determinación, mediante la inspección in situ, del avance del deterioro, producido por hongos xilófagos (hongos de pudrición), insectos de ciclo larvario (carcoma) o insectos sociales (termitas), y la resistencia residual a partir de medidas de velocidad de transmisión de ultrasonidos perpendiculares a la fibra. Se basa en la hipótesis de que la madera es un material heterogéneo de resistencia variable dado que, según la zona, puede presentar distintos niveles de deterioro por lo que su análisis debe realizarse por secciones.

<sup>1</sup> Esteban Herrero, M., Argüelles Álvarez, R., Ariaga Martitegui, F., Iñiguez González, G., Bobadilla Maldonado, I. "Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. Madrid, Abril-Junio (2007). pp. 15-27.

<sup>2</sup> Algunos trabajos se recogen el Capítulo I. Consideraciones previas.

Estos trabajos están basados en el procedimiento operatorio de la norma UNE 56537 de 1979 "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática" en la que las probetas de ensayo normalizadas tenían unas dimensiones de 20 mm de lado y 300 mm de longitud. En 2010, la norma UNE 384 "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad" sustituye a la norma UNE 384 de 2004 en la que ya se establecía que el método para la determinación de los valores característicos con ensayos sobre probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos se permite solamente para las frondosas. El desarrollo de este nuevo marco normativo implica unos nuevos criterios para la estimación de la capacidad resistente de la madera de coníferas, desarrollados a partir de probetas de tamaño estructural, por lo que a partir de aquí se define uno de los objetivos prioritarios del presente trabajo:

- A) Revisión de las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con parámetros resistentes (resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad estático (MOE)) a partir de probetas de tamaño estructural según la nueva normativa de obligado cumplimiento. Correlación de los resultados obtenidos con los resultados aportados por la clasificación visual.**

Actualmente, además de los parámetros resistentes módulo de rotura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) estimados mediante correlaciones con ensayos de ultrasonidos, la densidad es una de las variables clasificatorias empleadas por la UNE EN 338. Resulta evidente la necesidad de estimar la densidad de una madera para determinar su calidad estructural. Asimismo, la combinación de esta propiedad con las constantes elásticas del material obtenidas a partir de la velocidad de ultrasonidos permite obtener el módulo de elasticidad dinámico (Ed) y mejorar las correlaciones de predicción de las restantes variables clasificatorias, módulo de rotura a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE).

Sin embargo, la metodología actual de determinación de la densidad consiste en la extracción de muestras de la estructura, un procedimiento destructivo que ralentiza el proceso y que no siempre es posible. En este sentido, el resistógrafo, una técnica de ensayo cuasi no destructiva utilizada para verificar el estado interior de elementos de madera, permite, al mismo tiempo, estimar su densidad mediante una perforación realizada con una aguja de 3 mm de diámetro. Para ello, previamente, es necesario hallar las correlaciones existentes entre la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo, RM, por lo que a partir de estas premisas se define otro de los objetivos prioritarios:

- B) Hallar las ecuaciones que permiten correlacionar la densidad y la pérdida de densidad de la madera de *Pinus* con las medidas de resistógrafo, RM. Elaboración de una metodología para su aplicación in situ.**

Sin embargo, un requisito indispensable para la aplicación de estas técnicas es la necesidad de establecer un contacto directo con el elemento a inspeccionar. La inaccesibilidad o la dificultad que implica acceder a ciertos espacios y estructuras conllevan a que, en estas ocasiones, sea necesario buscar métodos complementarios de inspección. En este sentido, la aplicabilidad de la termografía en la construcción como técnica para el análisis energético de los edificios y como herramienta de control de calidad de algunos materiales (hormigón, cerámica,...) nos lleva a plantearnos su estudio como técnica de inspección no destructiva de estructuras de madera sin necesidad de establecer un contacto directo. De esta forma se define uno de los objetivos principales de este trabajo de investigación:

- C) Estudio de las posibilidades de la termografía de infrarrojos como técnica complementaria de inspección no destructiva de estructuras de madera.**

Finalmente, el análisis de la realidad constructiva de determinados forjados de madera, los llamados forjados de entrevigado cuajado, y de las técnicas de diagnóstico actuales, ponen de manifiesto el vacío existente en el campo de la inspección de edificios y la carencia de un método aplicable a este sistema constructivo que proporcione una lectura global de los elementos de madera constituyentes de estos forjados.

Esta tipología de forjados está caracterizada por un entrevigado relleno de cascotes y/o yeso o, en otros casos, aligerados mediante piezas huecas de barro o abovedados a partir de bovedillas de rasilla que actúan como encofrado perdido. Este desarrollo constructivo deriva en la inaccesibilidad de las caras laterales de las vigas resultando inviable la aplicación de las metodologías de inspección desarrolladas hasta el momento y basadas en la medición de las velocidades ultrasónicas en las caras de las piezas. Esta situación genera la necesidad de emplear técnicas alternativas de inspección, como el resistógrafo o el arranque de tornillos, herramientas que, sin embargo, ofrecen lecturas puntuales de los elementos analizados.

Así, y dada la importancia de este tipo de forjados, datados de los siglos XVIII y XIX y presentes, no solo en la arquitectura sevillana sino además, en otras regiones de España, hace que se plantee la necesidad de desarrollar un método de inspección aplicable a este sistema constructivo y capaz de ofrecer una lectura global del estado de conservación y capacidad resistente de los elementos del forjado analizados. De esta forma se define otro de los objetivos prioritarios de este trabajo:

- D) Desarrollar un método de inspección y análisis mediante la técnica de ultrasonidos para su aplicación a los forjados de entrevigado cuajado.**



## **III.2. OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS**

---





A lo largo de la experiencia acumulada en la aplicación de la metodología de ensayo no destructiva de ultrasonidos a obras de rehabilitación y teniendo en cuenta algunos trabajos recogidos en la bibliografía<sup>3</sup> se plantea como un objetivo complementario la necesidad de inquirir si es necesaria una discriminación entre dos especies de madera que, tradicionalmente, se han utilizado mezcladas: el pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y el pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Estas dos especies resultan indistinguibles anatómicamente a través de una inspección ocular por lo que es necesario recurrir a un análisis con microscopía para su identificación. Es por esto que desde el presente trabajo se plantea el siguiente objetivo:

- A) Discriminación de las especies de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) obteniendo los parámetros resistentes y el rango de valores de velocidades de transmisión de ultrasonidos característicos de cada especie. A partir de los resultados obtenidos será posible analizar las propiedades físicas y mecánicas de cada especie y concluir sobre la necesidad o no de una discriminación entre ambas maderas. En el caso que resulte necesario realizar esta distinción entre especies se estudiará la posibilidad de su identificación a través de los valores de velocidad de ultrasonidos. Asimismo, a partir de los resultados obtenidos, se propone obtener las ecuaciones que correlacionan las velocidades de transmisión de ultrasonidos con los parámetros resistentes (resistencia de rotura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)) para cada caso. El desarrollo del plan experimental de ensayos con ambas especies se propone a partir de probetas de tamaño estructural según la nueva normativa de obligado cumplimiento.**

Referido a la fase de intervención sobre una estructura tras realizar las labores de inspección y diagnóstico, el estudio de las soluciones actuales de reparación y/o refuerzo pone de manifiesto la necesidad de aportar un sistema alternativo a las soluciones de reparación mediante perfiles metálicos o a base de aporte de madera. Las soluciones de reparación mediante perfiles metálicos presentan problemas de corrosión y baja resistencia al fuego mientras que los refuerzos de madera, a menudo, presentan eficacias estructurales bajas. En este sentido, los refuerzos compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi) se presentan como una alternativa posible. No obstante, la falta de información sobre su funcionamiento provoca inseguridad en su aplicación. De esta forma desde este trabajo se plantea el siguiente objetivo:

- B) Sentar las bases de un estudio para obtener una solución de reparación y/o refuerzo de vigas de madera que cumpla las exigencias de eficacia estructural, facilidad de ejecución, durabilidad, compatibilidad con la madera, economía, integración estética y buen comportamiento al fuego. Se persigue el desarrollo de una solución constructiva viable tanto para el refuerzo de cabezas, deterioradas por el ataque de hongos e insectos xilófagos, como para el refuerzo de las piezas en los centros de vano, necesario por el agotamiento del material o cambios de uso.**

<sup>3</sup> Rodríguez Trobajo, E. "Procedencia y uso de madera de Pino Silvestre y Pino Laricio en edificios históricos de Castilla y Andalucía". *Arqueología de la Arquitectura*. Vol. 5. Madrid/Vitoria, Enero-Diciembre (2008). pp. 33-53.



### **III.3. OBJETIVOS PARCIALES**

---



Entre los objetivos parciales planteados desde esta investigación se propone:

**A) Realizar el estudio de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) a partir de pequeñas probetas.**

Se pretende estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) como material homogéneo a partir de pequeñas probetas. Se plantea realizar los siguientes ensayos:

Ensayos no destructivos:

- Determinación de las propiedades físicas de las probetas.
- Determinación de las velocidades de transmisión de ultrasonidos. Análisis de los factores de influencia sobre las velocidades de ultrasonidos (humedad, densidad, dirección de la fibra, distancia entre los transductores) en la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

Ensayos destructivos:

- Determinación de la resistencia a flexión de las probetas.

A partir de los resultados obtenidos se pretende establecer las correlaciones entre las velocidades de ultrasonidos y los parámetros resistentes característicos de esta especie mediante ensayos con pequeñas probetas.

**B) Comparar los resultados obtenidos con pequeñas probetas en investigaciones precedentes de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con los resultados obtenidos con probetas de tamaño estructural.**

Se pretende analizar si existen diferencias significativas entre las correlaciones obtenidas en ambos estudios.

**C) Comparar los resultados obtenidos en esta investigación con pequeñas probetas para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) con los resultados obtenidos con probetas de tamaño estructural.**

Se pretende estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) obtenidas por ambos procedimientos: probetas de tamaño estructural y pequeñas probetas. Asimismo, se pretende investigar si existen diferencias significativas entre las correlaciones obtenidas por ambos procedimientos de ensayo.



## **CAPÍTULO IV.**

# **ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

**IV.1. MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS DE MADERA**

**IV.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ELEMENTOS DE MADERA: ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

**IV.3. SOLUCIONES DE CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS FORJADOS DE MADERA: VIGAS Y VIGUETAS**





## **IV.1. MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVOS DE ESTRUCTURAS DE MADERA**

---

IV.1.1. INSPECCIÓN VISUAL DE LA MADERA. NORMAS ESPAÑOLA Y EUROPEA

IV.1.2. ENSAYOS DE ULTRASONIDOS EN MADERA

IV.1.3. LA TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS APLICADA A LA MADERA

IV.1.4. EL RESISTÓGRAFO: LA INSPECCIÓN CUASI NO DESTRUCTIVA DE LOS FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO



## IV.1.1. INSPECCIÓN VISUAL DE LA MADERA. NORMAS ESPAÑOLA Y EUROPEAS

### IV.1.1.1. Clasificación de la madera nueva para estructuras

Actualmente, la clasificación de madera nueva para estructuras se realiza en los aserraderos mediante métodos de clasificación visual.

En el marco de la Unión Europea cada país ha desarrollado unas normas propias de clasificación visual de la madera siguiendo sus propios criterios y adaptándose a sus especies más frecuentes y las particularidades que intervienen en el crecimiento de sus masas arbóreas.

No obstante, durante todo este proceso de elaboración de normas, ha estado vigente una norma europea de referencia, la UNE EN 518: Madera Estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente. Esta norma, editada en 1996, ha estado vigente hasta septiembre de 2007. Su objetivo era sentar las bases de las normas desarrolladas en cada país de modo que, todas ellas contasen con un mismo enfoque para establecer, entre otros parámetros, los valores de resistencia asignados a cada clase resistente determinados, del mismo modo, mediante metodologías de ensayo análogas. Asimismo, la norma UNE EN 1912 (Madera Estructural. Clases Resistentes. Asignación de las clases de calidad visual y de las especies) realiza una intercomparación entre las normas nacionales y, mediante su empleo, es posible conocer la correspondencia de una determinada clase resistente de una especie española con la misma clase resistente de otra especie en cualquier país europeo, signo del enfoque globalizador del actual mercado.

En Europa coexisten normas de gran arraigo como la alemana DIN 4074 (Clasificación de la madera de conífera según la capacidad de carga. Parte 1. 1989) con normas de más reciente aparición como la española UNE 56544 de 1997 y revisada posteriormente en los años 2003, 2007 y 2009. Este cierto retraso, ha permitido que actualmente toda la reglamentación y la caracterización mecánica de la madera se realicen en España de acuerdo a lo establecido en la diferente normativa europea.

Entre algunas normas de ámbito europeo encontramos:

- La norma DIN 4074 (Alemania) con las calidades visuales S13, S10, S7.
- La norma BS 4978 (Gran Bretaña).
- La norma INSTA 142 (Suecia, Finlandia, Dinamarca y Noruega) con las calidades visuales T0, T1, T2 y T3.
- La norma NF B 52-001 (Francia) con las calidades visuales ST-I, ST-II, ST-IV.

Algunos trabajos realizados desde el INIA estudian el grado de concordancia entre las distintas normas. En 2000, Díez et. al. presentan un trabajo en el que comparan los resultados de la clasificación visual de un lote de madera de pino laricio usando las normas UNE 56544 y DIN 4074. Los resultados demuestran la buena correlación entre ambas normas. Asimismo, no existe, en ningún caso, un salto de clase primera a rechazo en ninguna pieza.

### IV.1.1.2. Evolución de la norma de clasificación visual en España

La primera edición de la norma española de clasificación visual UNE 56544 es de 1997. El enfoque de esta norma iba dirigido a la clasificación de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L.), de pino pinaster (*Pinus Pinaster* Ait.), de pino insignis o radiata (*Pinus Radiata* Don), del eucalipto blanco (*Eucaliptos Globulus* Labill) y del chopo (*Populus* sp.), aunque la asignación de clases resistentes sólo era reconocida para las tres primeras especies.

Su criterio de clasificación distingue dos calidades: ME-1 y ME-2 sin hacer referencia al tamaño de las escuadrías.

La revisión de 2003 restringe su campo de aplicación únicamente a madera de coníferas ampliando su ámbito a la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y excluyendo de su aplicación la clasificación de la madera de chopo (*Populus* sp.) y eucalipto blanco (*Eucaliptos globulus* Labill).

En esta edición se define las dimensiones de una sección rectangular o cuadrada, en función de la cara, altura de cara o altura de sección (h) y el canto o espesor (b), haciendo referencia a la dimensión nominal, a las tolerancias dimensionales y a una humedad de referencia del 20% a partir de la cual se deben aplicar las correcciones pertinentes.

Sobre la madera de gran escuadría no introduce ninguna referencia específica, aunque define las piezas de sección de baja esbeltez como aquellas cuya relación h/b es menor que 1,5. Este tipo de piezas, se clasifican considerando los cuatro lados como si fueran caras.

En cuanto al contenido de humedad define dos estados: madera seca (dry graded) y madera húmeda (wet graded), estableciendo el valor del 20% como valor de referencia y especificando el contenido de humedad en el momento de clasificación de la madera y asignar una calidad.

La edición revisada de 2007, como en 2003, restringe su campo de aplicación a madera de coníferas, pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), pino laricio (*Pinus Nigra* Arn. Var. Salzmannii), pino gallego y pino pinaster (*Pinus Pinaster* Ait.), Pino insigne (*Pinus Radiata* D.Don).

Conforme a la asignación de calidades establece dos calidades denominadas, como en ediciones anteriores, ME-1 y ME-2 (ME hace referencia a Madera Estructural). Esta clasificación está referida a piezas cuyo grosor es menor que 70 mm. Para piezas con un grosor superior establece la calidad MEG (Gruesa Escuadría).

Esta clase resistente (MEG) aparece como resultado tras un estudio realizado desde el INIA y recogido en la tesis doctoral "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera". En esta tesis se propone una única calidad definida como ME (Madera Estructural) equivalente a la calidad ME-2. A las piezas que cumplen las especificaciones para esta única calidad se le asigna unas características de una clase resistente definida como F14/E18/D30, basada en un sistema mixto de clases resistentes definida en la norma UNE EN 338 cuyo significado es el siguiente:

- F14: valores de resistencia de la clase C14.
- E18: valores de elasticidad de la clase C18
- D30: Valores de densidad de la clase C30

Finalmente, la norma UNE 56544 asigna una clase resistente global a las piezas clasificadas como MEG que varía según la especie. Para el pino insigne otorga una clase resistente C16 mientras que para el pino silvestre y laricio una clase resistente C18.

### **IV.1.1.3. Parámetros de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007. Criterios de medición**

Los parámetros empleados en la clasificación visual están basados en las singularidades ligadas a la anatomía de la madera, al aserrado de las piezas y, finalmente se considera si se ha producido alguna alteración de tipo biológico por hongos o insectos xilófagos.

La influencia que cada uno de los factores ejerce sobre las propiedades mecánicas de la madera no es equivalente, por lo que, en función de las mismas cada una de las normas

europas establecerán sus propias restricciones considerando además las condiciones particulares del país.

La norma española UNE 56544 utiliza los siguientes principios de clasificación visual para la madera aserrada:

### Características generales:

- Contenido de humedad de referencia

La humedad en la madera es definida como la masa de agua contenida en la misma, expresada en porcentaje, respecto de su masa anhidra.

Para el proceso de clasificación visual de la madera y de medición de su densidad se especifica que el contenido de humedad debe ser inferior al 20%. Este contenido de humedad debe ser especificado en el momento de la medición y viene expresado, como en ediciones anteriores, en las siguientes clases de humedad:

- Madera clasificada en seco (Dry Graded): cuando el contenido de humedad medio sea inferior al 20%.
- Madera clasificada en húmedo (Wet Graded): cuando el contenido de humedad exceda los criterios de la clase anterior.

Su medición, cuando sea inferior al 30%, puede efectuarse haciendo uso de métodos eléctricos, de acuerdo a lo establecido en la Norma UNE-EN 13183-2.

- Densidad

Se medirá como la relación entre la masa y el volumen, determinados ambos valores a la misma humedad.

- Dimensiones

La norma UNE 56544 entiende como anchura de cara (h) la mayor dimensión perpendicular al eje longitudinal de la pieza y como espesor o grosor (b), la distancia entre las caras.

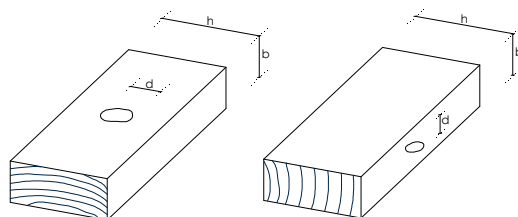
Por dimensión nominal se entiende la dimensión declarada para la pieza para un contenido de humedad del 20%. La desviación dimensional mide la diferencia entre la dimensión nominal y la real, descontando las diferencias dimensionales debidas a los cambios en el contenido de humedad respecto del valor de referencia (20%).

### Singularidades ligadas a la anatomía de la madera:

- Nudos

Son defectos ocasionados por las ramas del árbol. Es el defecto de mayor importancia ya que determina la capacidad resistente de la madera.

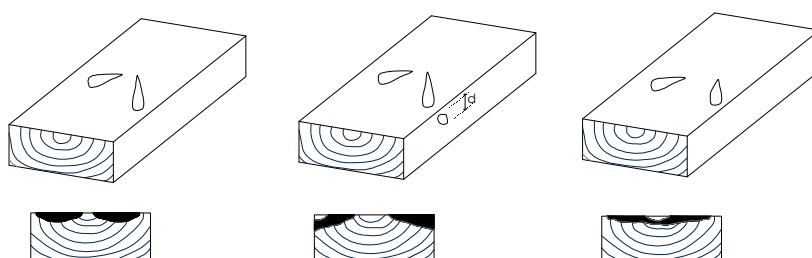
El sistema de medición de nudos está de acuerdo con el método alternativo definido en la norma UNE-EN 1310. De acuerdo con él, los diámetros se medirán perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza y en todas las superficies en que se manifiesten. Los nudos que se manifiesten en la cara se evaluarán mediante la relación entre el diámetro del nudo y la anchura ( $d/h$ ). Los nudos que se manifiesten en el canto se evaluarán mediante la relación entre el diámetro del nudo y el grosor ( $d/b$ ).



**Figura IV.1:** Criterio general de medición de nudos en cara y en canto. (UNE 56544:2007)

La posición de los nudos dentro de una pieza interviene directamente en su calidad resistente. Así, el tamaño máximo de nudo permitido por la norma para la asignación de una clase de calidad, ME-1 o ME-2, varía si éste se encuentra en la cara o en el canto de la pieza. Por otro lado, en piezas sometidas a flexión, un nudo situado en una posición cercana a la fibra neutra, donde las tensiones son menores, tiene menor relevancia que si su situación es próxima a la zona traccionada donde las tensiones son mayores.

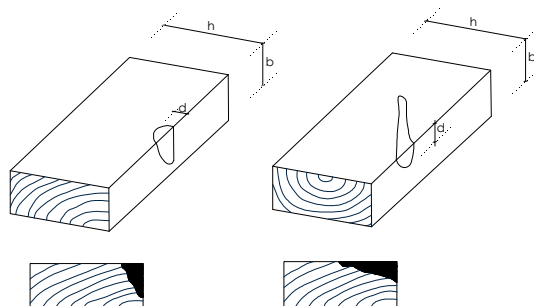
La norma UNE 56544 establece que los nudos con diámetro inferior o igual a 10 mm pueden despreciarse, excepto cuando son nudos pasantes. De la misma manera, desprecia los nudos superficiales de la cara interna. Se entiende por cara interna aquella cara que se encuentra más cerca de la médula y la contiene o está muy próxima a ella. Si aparecen en la arista o en el canto, se medirán y evaluarán como nudo de arista o de canto respectivamente.



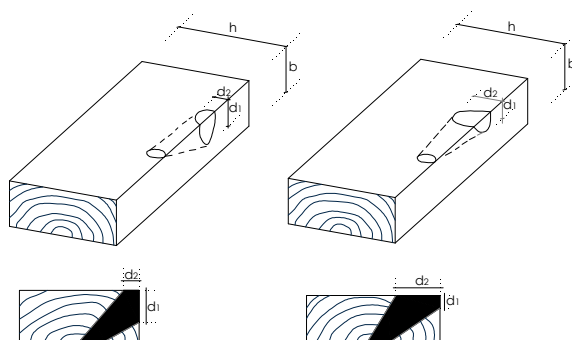
**Figura IV.2:** Nudos superficiales en la cara interna. (UNE 56544:2007)

Los orificios dejados por los nudos saltadizos se medirán como si fueran nudos.

Los *nudos de arista* son aquellos que se manifiestan en dos superficies contiguas, cara y canto. Se medirán y evaluarán en aquella superficie que los corte más perpendicularmente. En caso de duda se tomará la relación que resulte más desfavorable.

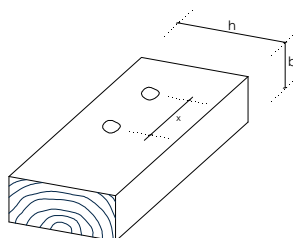


**Figura IV.3:** Criterio de medición y evaluación de nudos de arista. (UNE 56544:2007)

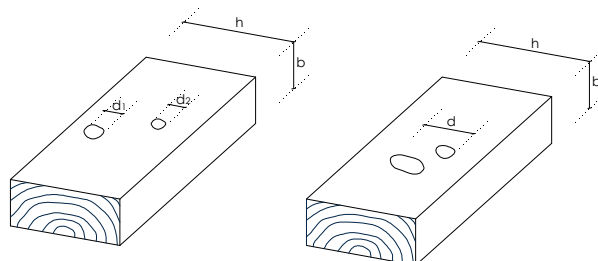


**Figura IV.4:** Criterio de medición y evaluación de los nudos de arista cuando existen dudas para su evaluación. (UNE 56544:2007)

Se denominan *nudos agrupados* sobre la cara o sobre el canto aquellos nudos cuya distancia entre centros, medida según el eje longitudinal de la pieza, sea menor o igual que 150 mm, o menor o igual a la anchura de la pieza cuando ésta sea menor de 150 mm. Su medición se realizará como la suma de sus diámetros cuando éstos no se solapen en la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza. Cuando los nudos se solapen se medirán globalmente.



**Figura IV.5:** Criterio de definición de nudos agrupados. (UNE 56544:2007)



**Figura IV.6:** Criterio de medición de nudos agrupados. (UNE 56544:2007)

- Bolsas de resina y entrecasco

De acuerdo con la Norma UNE-EN 1310, se medirán según su longitud (en mm), en la dirección paralela al eje de la pieza.

- Fendas

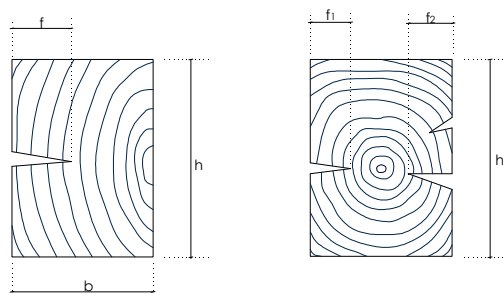
De acuerdo con la Norma UNE-EN 844-8, se denomina fenda a toda separación de las fibras en dirección longitudinal. Las fendas pueden ser de secado, de heladura, provocadas por rayos, de abatimiento,...

De acuerdo con la norma UNE-EN 844-9, una fenda será pasante cuando se extienda entre dos superficies opuestas. Según la superficie donde se manifiesten, las fendas podrán ser de cara, de canto o de testa.

Se medirá la profundidad de las fendas con una galga de 0,2 mm de espesor. No se tendrán en cuenta aquellas fendas que tengan una longitud inferior a la menor dimensión

de las dos siguientes:  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la pieza y 1 m. Las fendas cuya anchura no supere 1 mm pueden despreciarse.

Su evaluación se realizará dividiendo la profundidad máxima entre el grosor de la pieza. En el caso de fendas solapadas en la misma cara, se tomará la profundidad máxima que engloba a todas ellas. Cuando existan varias fendas en una misma sección, se evaluarán las profundidades máximas de cada cara.



**Figura IV.7:** Criterio de medición de fendas. (UNE 56544:2007)

- Acebolladuras

De acuerdo con la Norma UNE-EN 844-9, se denomina acebolladura a la separación, total o parcial, entre dos anillos de crecimiento contiguos.

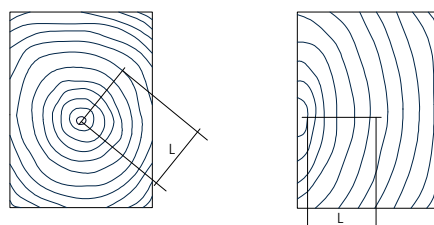
- Desviación de la fibra

De acuerdo con la norma UNE-EN 844-9, se denomina desviación de la fibra a su desviación media respecto del eje longitudinal de la pieza. Esta desviación se medirá sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable.

- Anillos de crecimiento

Esta norma incluye una limitación sobre la anchura máxima de los anillos de crecimiento, aplicable únicamente cuando la madera se clasifica y comercializa húmeda. Esto es así, porque la existencia de anillos anormalmente anchos en una sección, suele ser relevador de la presencia de madera juvenil. Este tipo de madera puede producir niveles de deformación inaceptables durante el secado.

La anchura máxima de los anillos de crecimiento se determinará en el segmento recto más largo que se pueda trazar perpendicularmente a los anillos de crecimiento y que atraviese la pieza transversalmente (Figura IV.8). La medida comenzará en el tramo más cercano a la médula, determinándose el valor medio de la anchura de los primeros cinco anillos de crecimiento. Si la médula no está presente, se medirán los cinco primeros anillos de crecimiento del lado más cercano a la médula.



**Figura IV.8:** Criterio de medición de espesor de los anillos de crecimiento. (UNE 56544:2007)

Anteriormente, la norma UNE 518 consideraba en su apartado 5.3 que la norma de clasificación debía establecer clasificaciones en función de la densidad o de la anchura del anillo. Esta exigencia se basaba en el criterio ampliamente establecido de que la



anchura del anillo de crecimiento es un indicador de la densidad y de la calidad mecánica de la madera. De hecho, numerosas europeas penalizan la anchura máxima del anillo (DIN 4074-1-1989, INSTA 142-1994, NFB-52-001-4, BS 4978,...). Sin embargo, existen numerosos trabajos que cuestionan la fiabilidad predictora de la anchura del anillo, especialmente en piezas de tamaño estructural de especies de crecimiento rápido, Pinus y Populus, así como el Eucalyptus Globulus. En estas especies, si el árbol crece rápidamente lo hace generando madera de verano, más densa y resistente.

En 1994, desde el INIA Fernández-Golfín y Díez Barra presentan un estudio sobre la influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera de diversas especies.

*Las principales conclusiones de este trabajo son:*

1. *La variación en la densidad y las propiedades a flexión de la madera estructural, parecen guardar muy pobre relación con la anchura del anillo de crecimiento.*
2. *La anchura del anillo de crecimiento tiene una validez muy reducida en la predicción de la calidad mecánica de la madera.*
3. *Es posible incrementar el crecimiento sin merma significativa de la calidad mecánica de la madera obtenida.*
4. *En todos los casos, salvo en Populus, es preferible el empleo de la densidad frente a la anchura del anillo, como variable predictiva de la calidad.*
5. *El uso conjunto de la anchura del anillo y la densidad en la predicción de la calidad mecánica de la madera no mejora la predicción efectuada únicamente con la densidad (salvo en Populus).*
6. *Para las especies y procedencias ensayadas se deduce que el considerar la anchura del anillo en las normas de clasificación visual de la madera estructural es inadecuado, debiéndose, en todo caso, hacer uso de la densidad.*
7. *La madera de estas especies y procedencias debe ser clasificada mediante normas que tengan en cuenta sus características de crecimiento y no haciendo uso de normas creadas para la clasificación de maderas de otras especies y/o procedencias. En este sentido el empleo de la anchura del anillo de crecimiento como factor delimitante de la calidad (impuesto por muchas normas de clasificación en Europa) no resulta sino una infundamentada barrera técnica a las maderas procedentes de especies de crecimiento rápido y/o procedentes de climas del Sur de Europa.*

Asimismo, en 2001 Fernández-Golfín y et al. presentan un estudio sobre la caracterización de la madera de pino laricio. Entre las conclusiones que extraen aparece que no es posible establecer una relación entre el tamaño del anillo y la densidad. Esto justifica según Fernández-Golfín "el aparente contrasentido de encontrar en la caracterización de las probetas de tamaño real maderas que teniendo anillos menores posean densidades también menores y abre la vía a la justa reclamación de eliminar el tamaño del anillo de crecimiento como indicador de la calidad mecánica de una madera".

- Madera juvenil

Afecta principalmente a algunas especies de coníferas en los primeros anillos de crecimiento. Se caracteriza por presentar una estructura anatómica diferente a la de la madera "adulta". Presenta elevados valores de contracción longitudinal produciendo en su secado elevados porcentajes de curvaturas de cara y de canto. Se identifica por la presencia de anillos de crecimiento anormalmente anchos.

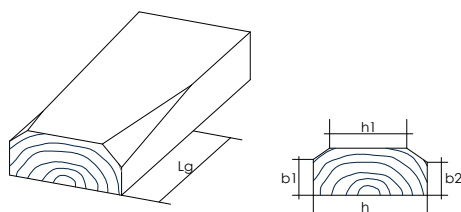
Esta norma no introduce limitación directa a su presencia aunque sí se establece un mecanismo indirecto para limitarla cuando la madera se comercializa en condición húmeda controlando la anchura máxima de los anillos de crecimiento.

### Singularidades ligadas al aserrado de las piezas:

- Gemas.

De acuerdo con la norma UNE-EN 844-3, se denomina gema a la superficie redondeada original de un tronco, con o sin corteza, que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1310, la gema se evaluará por su longitud (L) y por su dimensión transversal en relación a la longitud de la pieza y a las dimensiones de la sección (g), respectivamente, en la sección de máxima pérdida de arista (Figura IV.9). A efectos de longitud si la gema se manifiesta en más de una zona de una misma arista, se sumarán las diferentes longitudes.



**Figura IV.9:** Criterio de medición de gemas. (UNE 56544:2007)

Su evaluación se realiza siguiendo el siguiente criterio:

$$g = \max.\left(\frac{h-h_1}{h}, \frac{b-b_1}{b}\right)$$

donde,

b y h                      Grosor y anchura de la pieza, respectivamente  
h-h<sub>1</sub> , b-b<sub>1</sub>           Grosor o la anchura de las gemas, respectivamente.

- Médula.

De acuerdo, con la Norma UNE-EN 844-7, la médula es una zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente de tejido blando.

Su estructura anatómica es distinta a la del resto de la madera, y el problema de su presencia no radica en su influencia en la resistencia global de la pieza, sino que la madera de su proximidad puede ser madera juvenil.

### Alteraciones de tipo biológico que pueda presentar la madera:

- Alteraciones por hongos (azulado, pasmo, pudriciones,...)
- Alteraciones por plantas parásitas (muérdago)
- Alteraciones por insectos xilófagos.

Deformaciones de las piezas:

- Curvatura de cara y de canto.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1310, para determinar la curvatura, tanto de cara como de canto, se medirá la deformación máxima en un tramo de 2 m de longitud. Si la longitud de la pieza es inferior a 2 m, se medirá entre los extremos de la misma.

- Alabeo.

El alabeo se evalúa como la deformación máxima de la superficie sobre una longitud representativa de 2 m. El resultado se expresará en milímetros por cada 25 mm de anchura.

- Abarquillado.

El abarquillado se evalúa como la deformación máxima sobre la anchura de la sección. El resultado se expresará en milímetros por cada 25 mm de anchura o como fracción de la anchura total de la cara.

**IV.1.1.4. Aplicación de los parámetros de clasificación visual a estructuras existentes**

La asignación de las clases de calidad en madera mediante métodos de clasificación visual está vinculada fundamentalmente a la madera nueva para estructuras. Sin embargo, la inexistencia de otros métodos de clasificación reconocidos implica que este método se utilice para analizar la madera de estructuras preexistentes.

Así, al aplicar los criterios de las normas de clasificación visual sobre estructuras de edificios ya construidos nos hace plantearnos su eficacia debido a unas cuestiones fundamentales:

- Es necesario conocer el tipo de madera para saber qué normativa de clasificación visual aplicar. La norma analizada UNE 56544 es aplicable únicamente a la madera de coníferas mientras que si nos encontramos con frondosas debemos aplicar la norma UNE 56546. No obstante, esta última norma recoge únicamente la madera de eucalipto y con una sección inferior a 60x200 mm sin recoger nada sobre la madera de gran escuadría.
- Es necesario acceder a la estructura para poder llevar a cabo una medición de los defectos. En ocasiones esto no es posible ya que en muchos de los casos que se analizan, forjados, la cara superior de las piezas suele estar oculta por la tablazón o, en el caso de forjados de entrevigado cuajado, tan solo se encuentran al descubierto la cara inferior de los pares. En otros casos la superficie aparece pintada o con suciedad las cuales impiden ver sus defectos.
- Su aplicabilidad está sujeta a la subjetividad del operario.

Por todo ello, consideramos necesario un método de ensayo complementario no destructivo para la evaluación de la madera puesta en obra que nos permita, de forma fácil y fiable, establecer su capacidad resistente. Asimismo, en caso de haberse producido alteraciones biológicas, como pudriciones o ataques por insectos xilófagos, determinar la magnitud de la alteración y/o la pérdida de densidad producida y la resistencia residual de la estructura resultante.

### Notas del capítulo:

#### Normativa

UNE EN 518:1996. Madera estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente. Anulada el 01-09-2007.

UNE 56544:1997. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE 56544:1999. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE 56544:2003. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

UNE 56546:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas.

UNE EN 844-3:1996. "Madera serrada y madera en rollo. Terminología, términos generales relativos a la madera aserrada".

UNE EN 844-7:1997. "Madera serrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a la estructura anatómica de la madera".

UNE EN 844-8:1997. "Madera serrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las singularidades de la madera en rollo".

UNE EN 844-9:1997. "Madera serrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las singularidades de la madera aserrada".

UNE EN 1310:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades".

UNE EN13183-2:2002. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada- Parte 2: estimación por el método de la resistencia eléctrica".

#### Tesis doctorales

Esteban Herrero, M. "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera". Universidad Politécnica de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2003).

#### Artículos

Arriaga Martitegui, F., Iñiguez González, G., Esteban Herrero, M. "Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. (2007). pp. 29-41.

Díez, R., Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., Roskopf, S. "Clasificación visual de madera estructural de Pino Laricio (*Pinus Nigra* Arnold): Comparación de resultados usando las normas UNE 56544 y DIN 4074". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 9. Nº 2. (2000). pp. 375-380.

Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Baonza, M.V., Gutiérrez, A., Hermoso, E., Conde, M., Eynde V. Van den. "Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus nigra* Arnold *Salzmannii*)". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 10. Nº 2. (2001). pp. 311-331.

Fernández-Golfín, J.I. Díez, M.R. "Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 3. Nº 2. (1994). pp. 211-219.

#### IV.1.2. ENSAYOS DE ULTRASONIDOS EN MADERA

La técnica de ultrasonidos se emplea como método de evaluación no destructiva de la madera, además de en otros materiales como el acero o el hormigón. Los equipos de ultrasonidos son dispositivos capaces de generar una onda ultrasónica en un determinado medio con una frecuencia superior al límite de escucha humana 20 KHz, pudiendo alcanzar los  $10^9$  Hz. Su propagación en los diferentes medios materiales es análoga a la propagación de las ondas sonoras dentro del margen audible, aunque con una absorción mucho mayor, por lo que el aire se puede considerar prácticamente opaco para los ultrasonidos. Son lo que se denominan generadores de ultrasonidos.

Para la verificación de materiales mediante ultrasonidos pueden emplearse dos técnicas. La elección de uno u otro método dependerá de la microestructura del material a verificar:

- Método de intensidad o de transmisión. En él un generador de alta frecuencia excita a un cristal piezoeléctrico que transmite una onda sonora a la pieza a verificar. Un segundo cristal colocado de manera opuesta al primero recibe parte de la onda de presión emitida y mediante el efecto piezoeléctrico inverso se produce un voltaje eléctrico que se amplifica y se lee su intensidad mediante un instrumento de medida.
- Método del impulso eco. Con el método de impulso eco sólo se necesita un palpador, es decir, el cristal es emisor y receptor a la vez en un mismo palpador. En este método, como en el anterior, se mide la presión sonora sólo que en este caso se mide la presión sonora reflejada y no la transmitida.
- Método de resonancia. Exige un equipo más complejo y únicamente es aplicable en laboratorio a probetas de ciertas dimensiones. La probeta se excita en su frecuencia propia mediante un emisor electrodinámico de la oscilación. A partir de la frecuencia de resonancia, la densidad y las dimensiones de la probeta se determinan las constantes elásticas.

Para la verificación de materiales homogéneos el método del impulso eco es el más adecuado. En estos materiales la velocidad de propagación del sonido puede considerarse constante y se puede localizar la posición exacta de una discontinuidad así como el tamaño de la misma. No obstante, para materiales heterogéneos, como la madera o el hormigón, es más adecuado utilizar el método de transmisión. La frecuencia debe ser más baja que en el método de impulso eco para conseguir un mayor alcance de los impulsos y eludir las irregularidades del material. Al emplear el método del impulso eco, la energía de los impulsos ultrasónicos queda reflejada en las superficies límites y en los poros produciéndose una dispersión del impulso en todos los sentidos en el interior del material por lo que la energía reflejada es muy pequeña en relación con la emitida. Por ello, lo más adecuado es utilizar dos palpadores, uno emisor y otro receptor.

El empleo de la técnica de los ultrasonidos sobre madera se remonta a los años 50 del siglo pasado. Desde entonces son muchos los autores que han estudiado la aplicabilidad de la técnica sobre este material debido, en gran parte, al precio, relativamente bajo, de los equipos y a su fácil transporte. De este modo, en este campo se han abierto dos líneas de estudio en las que se emplea la técnica de ultrasonidos con finalidades diferentes:

1. Estimación de la capacidad resistente de la **madera nueva** en aserraderos, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos.
2. Cuantificar el estado de deterioro de **estructuras de madera en obras de rehabilitación**, a partir de la velocidad normal de ultrasonidos.

La mayor parte de la bibliografía centra sus estudios al primero de los casos, aplicando los ultrasonidos como técnica de clasificación de la madera nueva en aserraderos. De este modo, se toman distintos lotes de madera nueva de diferentes especies y procedencias y

se establecen correlaciones entre la velocidad longitudinal de ultrasonidos y los ensayos de rotura. Pocos son los trabajos que afrontan los ultrasonidos para el diagnóstico de estructuras deterioradas en obras de rehabilitación. En este sentido, el apartado "Estado de la Cuestión" del trabajo de investigación "Evaluación del estado de la madera mediante técnicas de ultrasonidos" desarrollado por Rubio de Hita, trabajo que precede al que estamos desarrollando, recoge las principales investigaciones realizadas por algunos autores para detectar pérdidas de densidad en la madera.

### **IV.1.2.1. Los ultrasonidos para la detección de estados de deterioro en la madera**

A modo general recogemos los trabajos de mayor relevancia citados en el "Estado de la Cuestión" del trabajo de investigación de Rubio de Hita<sup>1</sup>.

En 1984 **Arita K. y Kuratani K.** desarrollan un método y aparato de ensayo de postes de madera. Este método está basado en el uso de los ultrasonidos y tiene las siguientes características:

- Muestra la parte podrida de una sección de un poste de madera.
- Automáticamente hace un análisis de la resistencia residual del poste.

El proceso de toma de medidas que se propone es el siguiente:

- a) Toma de valores standard (tiempo de transmisión en madera sana). Normalmente se hace a 1-1,5 m por encima del nivel del terreno donde la madera está en perfectas condiciones, las medidas son diametrales y por tanto normales a los anillos de crecimiento.
- b) Medidas del grado de pudrición. En la parte del poste más cercana al terreno se toman 8 medidas diametrales del tiempo de propagación. Estas medidas se utilizarán para calcular el porcentaje de pudrición dentro del área deteriorada y en qué porcentaje ha disminuido la resistencia del poste.
- c) Localización de la pudrición dentro del poste. El tiempo de propagación se mide de nuevo en cuatro puntos situados a 90° con respecto al centro de la sección. Esta medida se efectúa en la misma sección en la que se ha efectuado la medida del grado de pudrición.

La conclusión más importante de este trabajo es que el diagnóstico de postes de madera basado en el método de los ultrasonidos es un método fácil y seguro para poder medir las pérdidas de resistencia de un poste de madera causadas por la pudrición del mismo.

En noviembre de 1984 **Tomikawa Y. et al.** publican otro trabajo relativo a la inspección no destructiva de postes de madera. Desarrollan dos métodos de investigación usando las características peculiares de la propagación de ultrasonidos en postes de madera con pudrición y las técnicas de tomografía computarizada de ultrasonidos.

La diferencia con el trabajo de Arita consiste en que en este caso se estudia la pudrición de los postes de pino americano producida en el centro de las piezas, pudrición que a efectos de estudio es muy similar a la producida por las termitas.

En ambos casos se obtiene una representación muy parecida a la real simplemente a partir de medidas del tiempo de transmisión de ultrasonidos. El uso de la tomografía resultó poco práctico debido al tiempo necesario para dibujar cada una de las secciones. Para solventar este problema debe mejorarse el tratamiento de los datos mediante hardware.

---

<sup>1</sup> Rubio de Hita, P.: Evaluación del estado de la madera mediante técnicas de ultrasonidos. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla (1997).

También en 1984 **Aggour M.S. et al.** publican un artículo como resultado de un proyecto de investigación donde presentan un procedimiento de inspección no destructiva para determinar la resistencia de pilotes de madera a partir de técnicas de ultrasonidos.

En EEUU el 70% de los puentes de carreteras están contruidos mediante pilotes de madera, por lo que es necesario verificar periódicamente su integridad estructural y predecir su vida remanente.

Con este objetivo se crea un banco de datos a partir de probetas preparadas del corte de secciones de los pilotes nuevos y viejos y en el que se consideran los factores que pueden afectar a la resistencia de la madera: tipo de madera, dirección de las fibras, densidad, contenido de humedad, efectos de un tratamiento protector, grado de pudrición y los efectos de los ensayos realizados sobre y bajo el agua.

Los ensayos no destructivos comprenden la lectura de los tiempos de ultrasonidos en las tres direcciones de la madera (normal, tangencial y paralelo a la fibra). Entre los ensayos destructivos se realizan ensayos de flexión y de compresión.

Resultados:

Con los datos obtenidos se establecen las siguientes correlaciones:

- Relación módulo elasticidad estático y dinámico. Se obtiene que el módulo dinámico es entre 5-15% mayor que el estático.
- Relaciones entre las velocidades de propagación. Los resultados indican que la velocidad en la dirección radial es alrededor de un 10% mayor que en la dirección tangencial. Por otro lado, la velocidad en la dirección paralela a la fibra es dos o tres veces la velocidad en dirección normal a la fibra.
- Relación entre el grado de pudrición y otras propiedades. Se estudia el efecto de la pudrición sobre otros parámetros resistentes como la resistencia a la compresión, módulo dinámico y la densidad. Para ello se detecta que para un porcentaje de reducción de la resistencia a compresión del 69%, se produce una reducción del 60% del módulo dinámico y una reducción del 55% de la velocidad y la densidad.
- Relación entre el contenido de humedad y la velocidad de propagación. Se detecta que la velocidad de propagación decrece alrededor de un 9% entre un contenido de humedad del 12% y un contenido del 24%.

Con todo ello se desarrolla un método analítico contemplando el efecto de la pudrición para la obtención de la capacidad de carga de un pilote. De esta forma, con estas correlaciones es posible dibujar el gráfico de distribución de resistencias a compresión en el sentido longitudinal de un pilote a partir de los valores de velocidad tomados in situ en las diferentes secciones.

En 1986 **Aggour et al.** publican una ampliación del trabajo anterior. Proponen unas rectas de regresión de dos variables obtenidas a partir de los ensayos de madera nueva y vieja para la determinación de la resistencia a compresión.

$$\text{Madera nueva} \quad \sigma_c = 0,537V_N + 6,34\rho$$

$$\text{Madera vieja} \quad \sigma_c = 0,292V_N + 46\rho$$

Estas ecuaciones son comprobadas comparando los resultados obtenidos mediante ensayos y experimentalmente. Los resultados no difieren más de un  $\pm 20\%$ .

En 1988 **Wilcox W.** publica un artículo sobre la detección de estados iniciales de pudrición mediante ultrasonidos. Para ello realiza dos tipos de ensayos:

1. Determinación de las velocidades de propagación en vigas de madera con pudrición parda, extraídas de las cubiertas de unas viviendas.
2. Determinación de las velocidades de transmisión en pequeñas probetas con estado de pudrición conocido (ataque controlado de hongos de pudrición).

Los ensayos se realizan con un aparato convencional y el método de transmisión utilizando palpadores cilíndricos de 37, 54, 150 y 500 KHz con material acoplante.

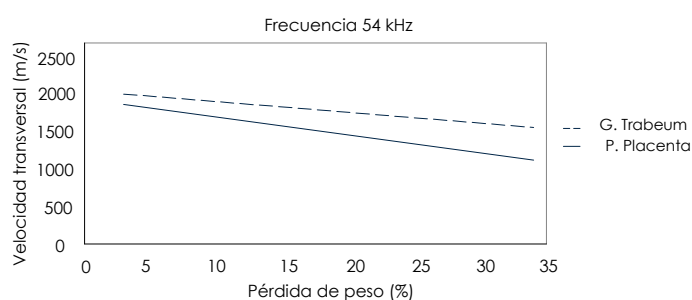
Los ensayos sobre madera de obra se realizan sobre 48 vigas en la que se toman medidas en transmisión directa e indirecta en el sentido longitudinal y perpendicular a las vigas. Posteriormente, para comprobar la pudrición interna se cortan las vigas por un plano central paralelo a los cantos.

Los ensayos en laboratorio se realizan sobre pequeñas probetas de dimensiones 4,4x5,1x0,6/1,3 cm sometidas a hongos de pudrición hasta conseguir distintas pérdidas de peso en función del grado de pudrición que tuvieran.

Resultados:

En los ensayos realizados en vigas de obra, las medidas en sentido longitudinal a la fibra y las indirectas resultan ineficaces en la determinación de las zonas de pudrición de la viga. Las medidas en sentido transversal también resultan inefectivas debido a que una de las caras estaba afectada por la pudrición lo que hace muy difícil el acople de los palpadores. Finalmente, las medidas realizadas situando los palpadores en los cantos de la viga resultan ser las más eficaces.

De los ensayos realizados en laboratorio sobre pequeñas probetas no se obtienen resultados debido a la pequeña dimensión de las mismas (probetas de 0,6 cm de espesor). Para las probetas de mayor espesor (1,3 cm) se obtienen las rectas de regresión que relacionan velocidad de propagación y el porcentaje de pérdida de peso (Figura IV.10). Estos resultados deben ser considerados teniendo en cuenta que el pequeño tamaño de las muestras hace que las diferencias que se encuentran entre los distintos estados de pudrición sean muy pequeñas. Estos tiempos están en los límites más bajos de medida que los aparatos eran capaces de detectar.



**Figura IV.10:** Relación entre la velocidad de propagación y el porcentaje de pérdida de peso. (Wilcox, W., 1988)

En España, las publicaciones sobre el uso de los ultrasonidos para la detección de estados de deterioro en madera se limita a los trabajos de Arriaga F. et al. en 1992, y Palaia L. y Galván V. et al. en 1994.

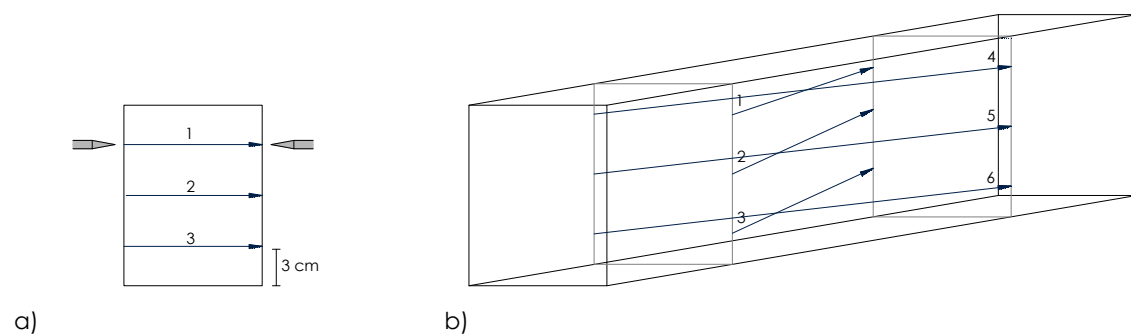
El trabajo de **Arriaga F.** de 1992, "Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera", consiste en la clasificación de 34 piezas de madera (20 vigas de un forjado y 14 pares de cubierta) siguiendo el procedimiento siguiente:



1. Clasificación visual.
2. Aplicación de la técnica de ultrasonidos.
3. Ensayos mecánicos destructivos.

Antes de comenzar este procedimiento realiza una exhaustiva medición y registro de las dimensiones y características naturales de las piezas (nudos, fendas, desviación de la fibra, espesor de anillos de crecimiento). Según los datos de esta medición las piezas son clasificadas visualmente de acuerdo a las Reglas Recomendadas por la Comisión Europea (ECE, 1982) que utiliza el sistema KAR17 para la evaluación de nudos.

Para la aplicación de la técnica de ultrasonidos emplea un equipo con frecuencia de ondas comprendida entre 40 KHz y 50 KHz. Los palpadores eran de forma cónica con puntas de acero inoxidable y el transductor estaba hecho de circonato-titanio de plomo. Las mediciones son realizadas en la dirección paralela y perpendicular a la fibra. Para las mediciones perpendiculares los palpadores se alinean de acuerdo a la Figura IV.11.a). Los tiempos de transmisión se midieron en los tres puntos marcados en la figura y la velocidad se calcula como la media de las tres posiciones.



**Figura IV.11:** Metodología de medición de las velocidades de propagación de ultrasonidos (a) En la dirección perpendicular a la fibra, b) En la dirección paralela a la fibra). (Arriaga, F., 1992)

Para las mediciones paralelas los palpadores se disponen de forma no directamente alineada (Figura IV.11.b)). En la zona del tercio central de la pieza, se toman seis lecturas de tiempos de propagación, entre dos secciones separadas entre sí 120 y 130 cm. La desviación de los palpadores es de 6-7° con respecto al eje de la pieza. La velocidad de propagación en la dirección paralela a la fibra se calcula como la media de las seis posiciones. El módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) se calcula mediante la expresión:

$$E_d = v^2 \cdot d$$

donde,

$E_d$	Módulo de elasticidad dinámico (N/mm <sup>2</sup> )
$V$	Velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas (m/s)
$d$	Densidad del material (Kg/m <sup>3</sup> )

Los ensayos mecánicos consisten en la determinación del módulo de elasticidad aparente en flexión ( $E_{ap}$ ), el módulo de elasticidad transversal ( $G$ ) y la tensión de rotura en flexión ( $\delta$ ).

El módulo de elasticidad aparente se determina apoyando la probeta en dos puntos separados entre sí 90 cm (5d) en su parte central. La carga se aplica en el centro del vano. El módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión se determinan apoyando la probeta sobre dos puntos separados 3 metros aproximadamente. La carga se aplica sobre dos puntos correspondientes a los dos tercios de la luz. Las deformaciones relativas se miden sobre el vano del tercio central de la pieza donde el cortante es nulo, determinándose el módulo de elasticidad en flexión pura ( $E$ ) sin influencia del esfuerzo cortante. Para determinar la tensión de rotura ( $\delta$ ) se continúa el aumento de la carga hasta la rotura. Conocido el módulo de elasticidad verdadero y aparente se calcula el módulo transversal o de cortante.

Resultados:

Del presente estudio Arriaga obtiene las siguientes correlaciones:

- Entre el KAR y  $\delta$  (tensión de rotura): 0,55 – 0,63.
- Entre  $E_d$  y  $\delta$  (tensión de rotura): 0,59.
- Entre E (módulo de elasticidad en flexión pura) y  $\delta$  (tensión de rotura): 0,76.

En el trabajo realizado en 1994 por **Palaia L. y Galván V.** se estudian la detección de estados iniciales de pudrición en la madera mediante la técnica de ultrasonidos y un análisis de frecuencia mediante el estudio de señales obtenidas con un osciloscopio.

El estudio se realiza sobre 12 probetas de madera de pino de Rusia, de dimensiones 15,8x6,8x2,9 cm a las que se le realizan diferentes perforaciones para simular una pérdida de densidad. Las lecturas se efectúan en las direcciones radial y tangencial, analizando las frecuencias, velocidades y amplitudes de las ondas de propagación en cada una de las probetas.

Resultados:

Las principales conclusiones que se obtienen son que la velocidad de ultrasonidos (para una frecuencia de 90 KHz) no es un parámetro válido para relacionar la pérdida de volumen de la probeta. Esta conclusión contradice las investigaciones precedentes, quizás porque la simulación de perforación efectuada no representa el estado real de una madera podrida o atacada. Por otra parte se encuentra que la amplitud de la señal transmitida analizada mediante osciloscopio varía en razón inversa al porcentaje de la pérdida de volumen de la probeta. Esto es una conclusión novedosa, pero tiene el inconveniente de su dificultad de puesta en práctica en obra.

Asimismo, en 1994 **Navarrete A. y Troya M.T.** estudian la validez de la técnica de los ultrasonidos para determinar la biodegradación sufrida por la madera a lo largo del tiempo. Para ello se analiza el comportamiento de un tipo de madera sometida a un tratamiento de rectificación y posteriormente expuesto al ataque de hongos de pudrición durante 5 meses.

El tratamiento de rectificación es una técnica que aumenta la durabilidad de la madera y que consiste en someterla a un tratamiento térmico en una atmósfera pobre en oxígeno. La degradación sufrida por las probetas se evalúa midiendo mensualmente la velocidad de transmisión ultrasónica durante el periodo de incubación. Una vez finalizado el mismo se estudian las pérdidas de peso sufridas por las muestras. Las medidas de ultrasonidos suponen en este trabajo un instrumento eficaz para detectar la pérdida de densidad causada por la acción de los hongos de pudrición.

### **IV.1.2.2. Los ultrasonidos para la evaluación de la capacidad resistente de la madera sana**

En el empleo de los ultrasonidos como técnica de clasificación, **Sandoz** llevó a cabo un importante estudio entre los años 1989 y 1993, en el que relaciona las variables mecánicas (MOR y MOE), obtenidas a partir de los resultados de la rotura a flexión de 580 vigas de abeto y pino, con la velocidad longitudinal de ultrasonidos. Con ello pretende establecer un método que permita estimar las variables mecánicas de acuerdo con las leyes físicas de propagación de ondas, garantizando la fiabilidad y rentabilidad de la clasificación de vigas de madera para construcción con respecto a las normas de clasificación visual.

Para realizar este trabajo hace un estudio comparativo de las normas de clasificación de maderas de países como Alemania (DIN 4074 (1989)), Francia (CB71, NF52001, Cahier 124 (clase BS)) y Suiza (SIA (1964)). Todas estas normas se basan en criterios visuales para la clasificación de madera. Del ensayo de pequeñas probetas se obtienen valores medios de

resistencia de rotura (Francia) o valores característicos asociados a un nivel de confianza del 95% (Suiza) para obtener el valor de tensión admisible asignado a cada clase de madera.

Los resultados obtenidos en los ensayos son recogidos en un banco de datos, NFDATA, en el que para cada viga se detalla su análisis visual, su velocidad ultrasónica, su densidad al 0% de humedad, su módulo de elasticidad (MOE) y su módulo de rotura (MOR). Los ensayos de flexión son realizados de acuerdo con el código CIB W18 y en referencia con la norma RILEM 3TT CIB-3 de 1978 a partir de cuatro puntos de carga.

En este trabajo se incluye un estudio de la influencia de los parámetros físicos sobre la velocidad de ultrasonidos. La técnica resultó ser muy sensible a la higroscopía de la madera y a su temperatura. Algunas mediciones realizadas sobre probetas en dos estados diferentes higroscópicos revelan una linealidad perfecta para dos series de valores. Los resultados muestran una disminución de la velocidad de un 0,8 % para un incremento de humedad del 1%, en el intervalo del 5 al 30%. De esta forma, se obtiene un modelo empírico para humedades por encima o por debajo del punto de saturación según las siguientes ecuaciones:

Para  $H < 28\%$

$$V_{H12} = \frac{V_{Hi}}{1 - 0,0053(H_i - 12)}$$

Para  $H > 28\%$

$$V_{H12} = \frac{V_{Hi}}{0,9152 - 0,00036(H_i - 28)}$$

siendo en cada caso;

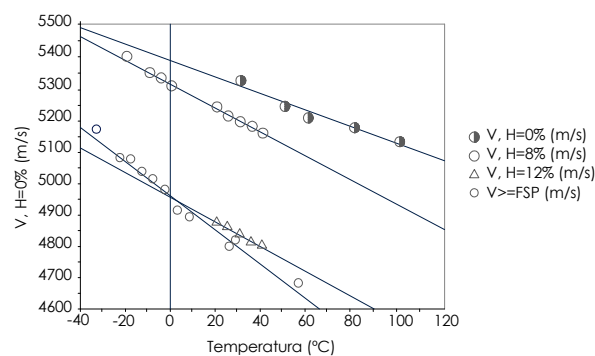
- $H_i$  Contenido de humedad medido
- $V_{Hi}$  Velocidad de ultrasonidos para  $H_i$
- $V_{H12}$  Velocidad de ultrasonidos al 12% de humedad

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre la propagación ultrasónica se toman medidas en probetas de un metro con diferentes contenidos de humedad. El rango de temperaturas osciló de  $-20^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ . Con todo ello Sandoz obtiene que la velocidad de ultrasonidos disminuye linealmente cuando la temperatura se incrementa (Figura IV.12.). Asimismo, la pendiente de la línea disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$a = -0,093 H_i - 2,778 \quad R^2 = 0,986$$

donde;

- $a$  Pendiente de la recta de la Figura IV.12.
- $H_i$  Contenido de humedad de la pieza



**Figura IV.12:** Influencia de la  $T^\circ$  sobre la velocidad de ultrasonidos para diferentes contenidos de humedad. (Sandoz, 1989)

Paralelamente, Sandoz estudia el efecto de los nudos sobre la velocidad de ultrasonidos obteniendo que, a medida que aumenta el número de nudos, disminuye la velocidad de ultrasonidos en una viga. Sin embargo, la correlación obtenida fue muy baja.

Resultados:

Los ensayos demuestran que las técnicas de clasificación visual son complejas, inciertas y poco fiables mostrando un margen de error que, para la norma suiza, alcanzó el 45%. Por ello quedó justificada la necesidad de otros procedimientos de evaluación como los ultrasonidos.

Sandoz correlaciona la velocidad de propagación de ultrasonidos con las dos variables mecánicas MOE (módulo de elasticidad a flexión) y MOR (tensión de rotura a flexión) a partir de las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \rightarrow 1/V^2 &= (A+B)/MOE & R^2 &= 0,67 \\ \rightarrow V &= A+B \cdot \sqrt{MOR} & R^2 &= 0,44 \end{aligned}$$

La correlación obtenida con la densidad (d) es de calidad inferior (valor de densidad considerado al 0% de humedad):

$$\rightarrow V^2 = (A+B)/d \quad R^2 = 0,18$$

Finalmente, Sandoz propone un criterio de clasificación de vigas en función de la velocidad longitudinal de ultrasonidos ( $V_L$ ):

$5650 \text{ m/s} \geq V_L$	Clase 0 (maderas de alta resistencia)
$5500 < V_L \leq 5650 \text{ m/s}$	Clase I
$5350 < V_L \leq 5500 \text{ m/s}$	Clase II
$4800 < V_L \leq 5350 \text{ m/s}$	Clase IV
$V_L < 4800 \text{ m/s}$	Fuera de clase

Las velocidades son tomadas en vigas con un contenido de humedad del 12% y una temperatura de 20 °C.

Los valores de las variables mecánicas, MOR (N/mm<sup>2</sup>) y MOE (N/mm<sup>2</sup>), de cada una de las clases consideradas son los siguientes:

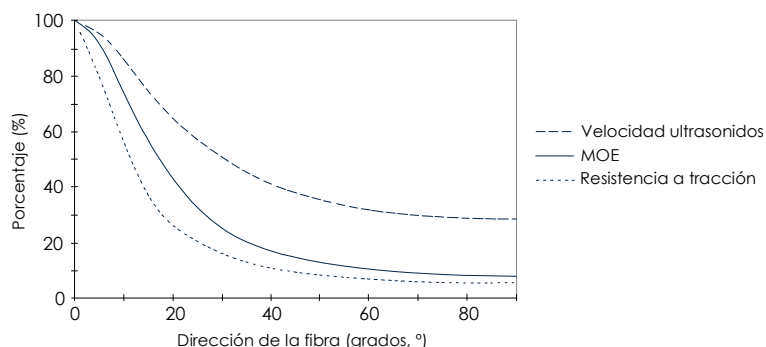
46,4 N/mm <sup>2</sup> - 15156 N/mm <sup>2</sup>	Clase 0
39,9 N/mm <sup>2</sup> - 14772 N/mm <sup>2</sup>	Clase I
29,1 N/mm <sup>2</sup> - 12652 N/mm <sup>2</sup>	Clase II
24,4 N/mm <sup>2</sup> - 10312 N/mm <sup>2</sup>	Clase IV

La conclusión más importante de este trabajo es que es posible establecer un sistema de clasificación basado en el uso de los ultrasonidos y en la distribución normal de la población estudiada para la caracterización mecánica de vigas de madera. Los resultados obtenidos con este método son muy buenos para la estimación del MOE,  $R^2=0,67$ , y para la estimación del MOR se obtienen correlaciones de  $R^2=0,44$  y  $R^2=0,28$  en caso de considerar los nudos.

Con todo ello este método puede ser considerado como un método válido para la clasificación mecánica de la madera y es la única alternativa a la clasificación visual práctica y rentable.

En 1997, **Rajeshawar et al.** presentan un estudio en el que emplean los ultrasonidos como técnica de evaluación no destructiva para la calificación mecánica de la madera a partir de la correlación estadística con ensayos de rotura a tracción.

En este trabajo se incluye un estudio (Figura IV.13.) sobre la influencia de la dirección de la fibra y los nudos de borde en la velocidad de ultrasonidos, variables que intervienen significativamente en la resistencia a tracción de la madera.



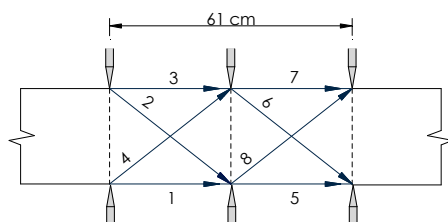
**Figura IV.13:** Representación gráfica de la fórmula de Hankinson sobre el efecto de la dirección de la fibra en las propiedades de la madera. (USDA, 1987).

Los resultados obtenidos ratifican algunos estudios anteriores (Lee, 1958) y demuestran que, sobre la velocidad de ultrasonidos, la dirección de la fibra provoca una bajada de velocidad sobre la velocidad longitudinal (0°) de más de 1% por cada grado, entre 0° y 30°, registrando las pérdidas más importantes para ángulos inferiores a 20°. Asimismo, se demuestra que los defectos, en este caso nudos, provocan una bajada de velocidad de ultrasonidos más acusada cuanto menor sea la separación entre los transductores.

Para la calificación de la madera en función de la velocidad de ultrasonidos se tomaron 200 piezas con una escuadría de 50x150 mm y 4,27 m de longitud. El contenido de humedad medio de las piezas es de 10,3%.

La determinación del módulo de elasticidad (MOE) se realiza siguiendo el procedimiento experimental de la norma ASTM D198-94. Para ello divide la probeta en 4 segmentos centrales de 61 cm distando 91 cm de los extremos. La influencia a cortante fue reducida midiendo la desviación con respecto a la cabeza de carga en la parte central de la viga.

Los ensayos de ultrasonidos se realizan en los segmentos 1 y 4 situando los transductores en la dirección normal y diagonal a las piezas (Figura IV.14). Posteriormente estos segmentos son ensayados a tracción de acuerdo al procedimiento T119 de la norma AITC 200-92. Con todos los datos se extrajeron las correlaciones para desarrollar los modelos estadísticos de predicción de la resistencia a tracción a partir de los ensayos de ultrasonidos.



**Figura IV.14:** Metodología de medición de las velocidades de ultrasonidos en las vigas. (Rajeshawar et al., 1997)

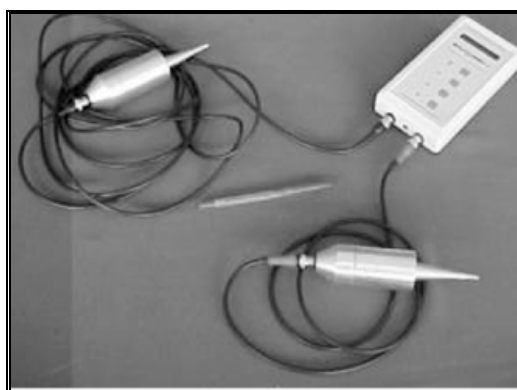
#### Resultados:

Los resultados demostraron que, la técnica de ultrasonidos, es una técnica eficaz para predecir la dirección de la fibra de la madera y los nudos de borde. Por otro lado, la correlación con los ensayos a tracción alcanzó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 72,8%. Finalmente, en ocasiones, los resultados de ultrasonidos no resultaron ser una buena variable predictora debido a que las mediciones realizadas fueron parciales sin contener, en algunos casos, la sección defectuosa de las piezas.

En esta misma línea, en 2001, **Oliveira et al.** presentan un trabajo sobre la aplicación de los ultrasonidos en la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera de Brasil. Su objetivo es analizar la fiabilidad de la técnica frente a los ensayos mecánicos.

Los ensayos realizados se basan en correlacionar la velocidad de ultrasonidos con el módulo de elasticidad y la densidad de las especies "cupiúba" (*Goupia glabra*) y "jatobá" (*Hymenaea sp.*). Ensayan 16 vigas de cada especie de dimensiones 50x50x1150 mm obteniendo su densidad aparente y el módulo de elasticidad dinámico,  $E_d$ , para un contenido de humedad del 12%.

En cuanto a ensayos mecánicos, de cada especie se ensayan 8 vigas a flexión según el Código Brasileño NBR 7190/97, aplicando una carga puntual en la mitad de la luz. De esta forma se calculó el módulo de elasticidad estático (MOE) y el módulo de rotura (MOR).



**Figura IV.15:** Equipo SYLVATEST empleado para los ensayos de ultrasonidos con transductores de 22 KHz. (Rajeshawar et al., 1997)

Resultados:

Estos resultados obtenidos permiten concluir que la técnica de ultrasonidos se puede emplear para obtener evaluaciones fiables de las propiedades mecánicas de las dicotiledóneas. Las correlaciones obtenidas son las siguientes:

Cupiúba

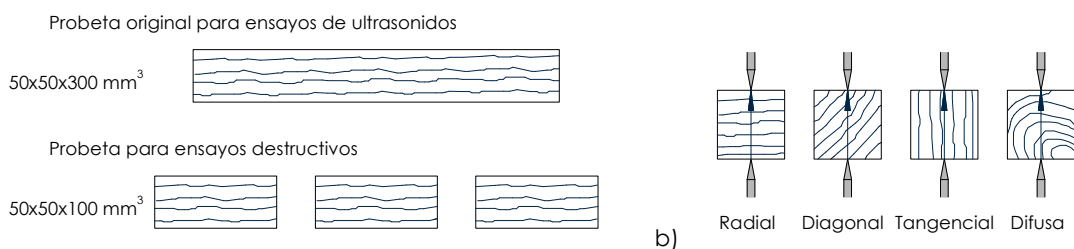
$$\begin{aligned} \text{MOE} &= 1,1374 E_d - 4736 & R^2 &= 0,63 \\ \text{MOR} &= 0,0093 E_d - 49,97 & R^2 &= 0,36 \end{aligned}$$

Jatobá

$$\begin{aligned} \text{MOE} &= 0,6196 E_d - 4787 & R^2 &= 0,59 \\ \text{MOR} &= 0,0045 E_d - 26,38 & R^2 &= 0,55 \end{aligned}$$

En 2006, desde Portugal **Lourenço P. et al.** presentan un artículo en el que emplean métodos no destructivos (resistógrafo, pylodin y ultrasonidos), mediante regresiones lineales con ensayos destructivos, para la evaluación de la resistencia y la rigidez de la madera de castaño (*Castanea sativa* Mill). A continuación se exponen los resultados obtenidos con ultrasonidos.

Para realizar los ensayos preparan un conjunto de probetas de dimensiones 50x50x300 mm<sup>3</sup> (reducidas a probetas de 50x50x100 mm<sup>3</sup> tras los ensayos de ultrasonidos) y divididas en madera nueva y vieja. Ambos grupos se dividen a su vez en cuatro grupos en función de la orientación de los anillos de crecimiento con la dirección de carga (Figura IV.16).



**Figura IV.16:** Probetas de ensayo (a) Probetas originales para ensayos de ultrasonidos de 50x50x300 mm<sup>3</sup> y probetas de 50x50x100 mm<sup>3</sup> para ensayos destructivos, b) División de las probetas en grupos en función de la orientación de los anillos de crecimiento). (Lourenço P. et al., 2006)

Las probetas se acondicionan en una cámara climática a temperatura y humedad constante hasta alcanzar una densidad constante. Seguidamente se determinan sus propiedades físicas y mecánicas. La densidad se determina como la relación entre la masa y el volumen según la UNE EN 408 a una humedad del 12%. Para el conjunto de las 160 probetas se obtienen diferencias inferiores al 2% entre madera nueva y vieja, con una media de 585,4 Kg/m<sup>3</sup> para la madera nueva y 597,2 Kg/m<sup>3</sup> para la madera vieja.

Los ensayos de compresión uniaxial se realizan según la Norma Brasileña NBR 7190. La fuerza de compresión,  $f_{c,90}$ , perpendicular a la fibra se define como el valor determinado por una deformación residual del 2%. La rigidez de la madera, en la dirección perpendicular a la fibra, es determinada por su módulo de elasticidad,  $E_{c,90}$ . Este módulo se define como la pendiente de la parte lineal en la relación tensión deformación:

$$E_{c,90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$$

donde;

$\sigma_{10\%}, \sigma_{50\%}$	Tensiones correspondientes al 10% y el 50% de la tensión máxima
$\epsilon_{10\%}, \epsilon_{50\%}$	Deformaciones correspondientes a las tensiones correspondientes entre el 10% y 50% de la tensión máxima

Los resultados de los ensayos de compresión uniaxial ponen de manifiesto que la diferencia entre los resultados de madera nueva y vieja es de muy baja a moderada alcanzando los valores máximos en la dirección radial. El coeficiente de variación medio es del 16%.

En cuanto a los ensayos no destructivos, las medidas de velocidad de ultrasonidos son realizadas mediante transductores cilíndricos y utilizando el método indirecto. De este modo, para las probetas en dirección diagonal y difusa se toman medidas en todas las caras, mientras que para las probetas en las direcciones radial y tangencial se toman medidas únicamente en dos caras opuestas. A partir de estas mediciones es posible obtener el módulo de elasticidad dinámico mediante la siguiente expresión:

$$E_d = v^2 \cdot d$$

donde;

$E_d$	Módulo de elasticidad dinámico (N/mm <sup>2</sup> )
$v$	Velocidad longitudinal de ultrasonidos (m/s)
$d$	Densidad de las muestras (Kg/m <sup>3</sup> )

Resultados:

Los resultados obtenidos permiten afirmar que, sobre madera sana, el historial de carga y el tiempo no influyen sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera sana. Las correlaciones obtenidas entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad o la resistencia en compresión se detallan a continuación:

*Madera nueva*

Radial	$E_{c,90} = -140,26 + 0,078 E_{din}$	$R^2 = 0,95$
	$f_{c,90} = -5,21 + 0,001 E_{din}$	$R^2 = 0,89$
Diagonal	$E_{c,90} = 90,96 + 0,046 E_{din}$	$R^2 = 0,82$
	$f_{c,90} = -0,61 + 6,67 E_{din}$	$R^2 = 0,71$
Tangencial	$E_{c,90} = -332,51 + 0,072 E_{din}$	$R^2 = 0,88$
	$f_{c,90} = -3,28 + 8,21 E_{din}$	$R^2 = 0,82$
Difusa	$E_{c,90} = -861,61 + 0,125 E_{din}$	$R^2 = 0,74$
	$f_{c,90} = -8,71 + 0,0013 E_{din}$	$R^2 = 0,78$

*Madera vieja*

Radial	$E_{c,90} = -224,8 + 0,078 E_{din}$	$R^2 = 0,97$
	$f_{c,90} = -5,46 + 0,001 E_{din}$	$R^2 = 0,82$
Diagonal	$E_{c,90} = 209,17 + 0,034 E_{din}$	$R^2 = 0,87$
	$f_{c,90} = -0,84 + 6,59 E_{din}$	$R^2 = 0,76$
Tangencial	$E_{c,90} = -236,63 + 0,057 E_{din}$	$R^2 = 0,86$
	$f_{c,90} = -3,08 + 7,43 E_{din}$	$R^2 = 0,89$
Difusa	$E_{c,90} = -47,12 + 0,048 E_{din}$	$R^2 = 0,94$
	$f_{c,90} = -0,79 + 4,38 E_{din}$	$R^2 = 0,73$

Los resultados ponen de manifiesto la buena correlación existente entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad o la resistencia de compresión para todos los casos analizados. Estas correlaciones son mejores cuando se utiliza el módulo de elasticidad dinámico que empleando únicamente la velocidad de ultrasonidos lo que demuestra que el conocimiento de la densidad es muy importante para obtener correlaciones fiables.

En **España**, los trabajos realizados en los últimos años, llevados a cabo principalmente por el INIA (Instituto de Investigaciones Agrarias), la ETSI (Escuela Técnica Superior de Ingeniería) de Montes de Madrid o la Universidad de Valladolid, van encaminados a estudiar el empleo de los ultrasonidos, entre otras técnicas de ensayo no destructivas, para la clasificación de la madera nueva en aserraderos. En este sentido, siguiendo metodologías similares, aparecen varios trabajos de investigación y tesis doctorales en los que se determinan las propiedades mecánicas de distintos lotes de madera (distinta procedencia o especie botánica).

En 2001, **Hermoso Prieto** desde la ETSI de Madrid presenta una tesis doctoral con el tema "Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L". Los resultados obtenidos en este trabajo aportan las siguientes correlaciones:

$MOE = -1849,35 + 25,1162 d$	$R^2 = 0,242$
$MOE = 2823,9 + 19,4665 d - 3267,1 \Phi_{cara} - 2282,42 \Phi_{canto}$	$R^2 = 0,349$
$MOE = 1508,62 + 0,895414 E_d$	$R^2 = 0,264$
$MOR = -32,4204 + 0,148438 d$	$R^2 = 0,199$
$MOR = 5,74424 + 0,103103 d - 26,8522 \Phi_{cara} - 21,7263 \Phi_{canto}$	$R^2 = 0,447$
$MOR = 3,76253 + 0,00289215 E_d$	$R^2 = 0,261$
$MOR = -10,3342 + 0,00485084 MOE$	$R^2 = 0,554$

En 2003, **Esteban Herrero** también desde la ETSI de Madrid presenta un trabajo de investigación con el tema "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera".

Para llevar a cabo esta investigación se analiza un conjunto de piezas procedentes de diferentes obras de rehabilitación. Las piezas se extraen de forjados, cubiertas o pilares y se



agrupan en función de la obra de procedencia y de la especie botánica. Así, el conjunto más representativo cuenta con 26 piezas de la misma especie botánica aunque no se detalla si tienen la misma escuadría o han tenido la misma finalidad estructural. Esta heterogeneidad (tanto en escuadrías, especies botánicas y comportamiento estructural de las piezas durante su funcionamiento) origina que los resultados sean muy dispersos y particulares con unos coeficientes de determinación muy bajos, por lo que no son extrapolables a otras estructuras existentes.

En 2007, **Iñiguez González** presenta una nueva tesis doctoral con el título "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural".

En este trabajo se pretende, por un lado, evaluar la norma de clasificación visual vigente aplicada a piezas de gran escuadría y, por otro, analizar una serie de técnicas no destructivas (ultrasonidos, análisis de vibraciones, métodos de penetración y resistencia al arranque de tornillo). Para ello se estudian un total de 395 piezas de tamaño estructural de especies de coníferas: pino radiata, silvestre y laricio cuyas dimensiones transversales son 150x200 mm y 200x250 mm.

$MOE = 2205,58 + 14,91 d$	$R^2 = 0,28$
$MOE = -9420,57 + 4,1919 VI - 2109,64 Z_{rad} - 1113,86 Z_{sil}$	$R^2 = 0,53$
$MOE = 330,40 + 0,7548 E_d - 416,55 Z_{rad} + 249,10 Z_{sil}$	$R^2 = 0,74$
$MOR = -13,63 + 0,09502 d$	$R^2 = 0,29$
$MOR = -48,52 + 0,0190 VI - 18,20 Z_{rad} - 7,27 Z_{sil}$	$R^2 = 0,50$
$MOR = -3,65 + 0,0034 E_d - 10,52 Z_{rad} - 1,19 Z_{sil}$	$R^2 = 0,60$
$MOR = 14,12 + 0,005011 MOE$	$R^2 = 0,65$

donde,

$Z_{rad}$  1 (pino radiata), 0 (resto de especies)  
 $Z_{sil}$  1 (pino silvestre), 0 (resto de especies)

En ninguno de estos trabajos, a pesar de la gran cantidad de materiales y medios utilizados, se analiza la realidad constructiva de un edificio ni se propone una metodología de ultrasonidos de aplicación práctica para la evaluación in situ de una estructura de madera en una obra de rehabilitación. Los objetivos, en todos los casos, están encaminados a la evaluación de madera nueva en aserraderos o piezas desmontadas de obras.

Paralelamente al desarrollo de estas tesis doctorales se publican una serie de trabajos:

En 2006, desde el INIA y la Universidad de Valladolid **Acuña et al.** publican un interesante artículo en el que se muestra que el valor de la velocidad de ultrasonidos está afectado por la distancia y por el ángulo que forma los transductores con la dirección de la fibra, debiendo ser corregida cuando se trabaja con piezas de madera de tamaño estructural. Asimismo, se determina que existe una buena relación entre los parámetros resistentes determinados por la técnica de ultrasonidos y los ensayos de flexión estática.

En una segunda fase del trabajo se aplican los resultados obtenidos a la clasificación resistente de la madera de *Pinus Pinaster* Ait., extrayendo mejores rendimientos que con la norma de clasificación visual UNE 56544:2003.

- Análisis de la influencia de la inclinación de la fibra y de la longitud de la pieza.

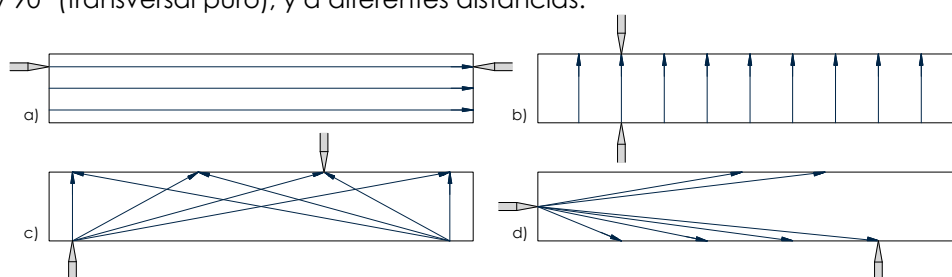
Para determinar la influencia de la inclinación de la fibra y de la longitud de la pieza sobre la velocidad de ultrasonidos se utilizan piezas de madera sana de tamaño estructural y

calidad visual ME-1 de 5 especies: *Pinus sylvestis* L, *Pinus radiata* D.Don, *Pinus pinaster* Ait, *Fagus sylvatica* L y *Chlorophora excelsa* Benth & Hook f.

Las piezas se dimensionan y se acondicionan hasta alcanzar un 12% de humedad. Tras realizar los ensayos se determina con exactitud el contenido de humedad tomando una muestra representativa y midiendo su peso en estado anhidro.

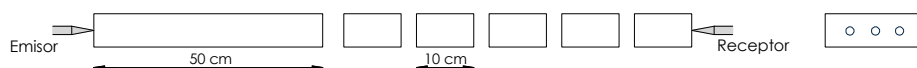
La determinación de las velocidades de ultrasonidos se realiza con un equipo Sylvatest que trabaja a una frecuencia de 30 kHz y dos palpadores, uno emisor y otro receptor. Para mejorar el acoplamiento entre los palpadores y la madera, se practica un orificio de 5 mm de diámetro y 1 cm de profundidad donde se introducen los extremos de las sondas.

Para determinar la influencia de la inclinación de la fibra en las mediciones de velocidad de ultrasonidos se realizan medidas con los palpadores enfrentados en las direcciones longitudinal, transversal y con un ángulo  $\alpha$  con respecto a la dirección de la fibra (Figura IV.17). Se realizan un total de 1223 medidas con distintos ángulos, entre 0° (longitudinal puro) y 90° (transversal puro), y a diferentes distancias.



**Figura IV.17.** Metodología de medición de ultrasonidos para el estudio de la influencia de la inclinación de la fibra sobre las velocidades (a) Longitudinales, b) Transversales y c) y d) Con un ángulo  $\alpha$ . (Acuña et al., 2006)

Asimismo, para analizar la influencia que pueda tener la distancia entre los palpadores frente a la velocidad de propagación de ultrasonidos se utilizan las muestras de las especies *Pinus Sylvestris*, *Pinaster* y *Radiata*, en las que se mide la velocidad entre testas, realizándose 3 medidas en la pieza completa y otras tantas en las piezas que fueron resultando de ir cortando la pieza de 10 en 10 centímetros desde uno de sus extremos hasta llegar a una pieza de 50 cm de longitud (Figura IV.18).



**Figura IV.18.** Estudio de la influencia de la longitud de las probetas sobre la velocidad de ultrasonidos. Corte de las piezas hasta llegar a una longitud de 50 cm. (Acuña et al., 2006)

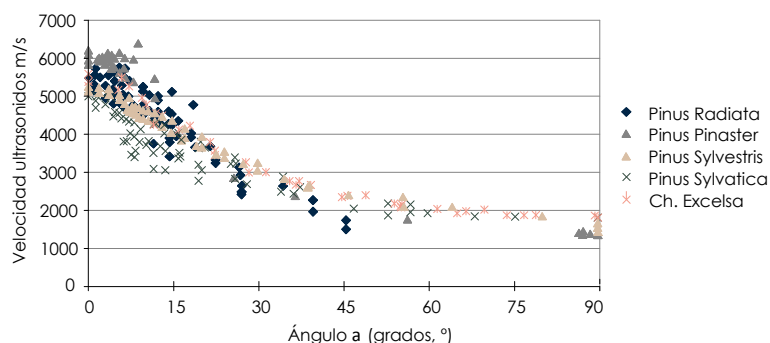
#### Resultados:

Los resultados de las mediciones longitudinales y transversales se recogen a continuación:

		<i>P.Sylvestris</i>	<i>P. Pinaster</i>	<i>P. Radiata</i>	<i>F.Sylvatica</i>	<i>C. Excelsa</i>
Velocidades longitudinales	Media (C.V.)	5496,3 (5,95)	5671,8 (1,47)	5574,8 (4,15)	4974,11 (0,38)	5414,57 (1,96)
	Nº de medidas	66	92	36	48	32
	Distancia de medida	450 cm	400 cm	375 cm	350 cm	170 cm
Velocidades transversales	Media (C.V.)	1927,6 (6,65)	1436,6 (5,54)	1531,1 (1,36)	1775,2 (1,74)	1826,5 (1,85)
	Nº de medidas	160	180	140	120	52
	Distancia de medida	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	40 cm

Las medidas en sentido transversal se realizan en la dirección más ancha de la sección de las piezas, predominando la dirección tangencial.

El análisis de la influencia del ángulo de inclinación de la fibra sobre las velocidades de transmisión arroja un gráfico en el que se refleja una bajada de la velocidad de ultrasonidos conforme aumenta el ángulo de inclinación (Figura IV.19).



**Figura IV.19.** Relación entre la velocidad de ultrasonidos (m/s) y la dirección de las fibras. (Acuña et al., 2006)

Los datos representados quedan recogidos en las siguientes ecuaciones de regresión:

<i>Pinus Sylvestris</i> :	$VI = 0,488 \alpha^2 - 83,04 \alpha + 5446,8$	$R^2=0,877$
<i>Pinus Pinaster</i> :	$VI = 0,652 \alpha^2 - 112,66 \alpha + 5671,8$	$R^2=0,943$
<i>Pinus Radiata</i> :	$VI = 0,712 \alpha^2 - 110,47 \alpha + 5574,8$	$R^2=0,942$
<i>F. Sylvatica</i> :	$VI = 0,582 \alpha^2 - 85,772 \alpha + 4855,7$	$R^2=0,918$
<i>Chlorophora Excelsa</i> :	$VI = 0,680 \alpha^2 - 101,73 \alpha + 5613,3$	$R^2=0,984$

De esta forma, conocido el ángulo que forman la dirección longitudinal de las fibras y la dirección de emisión-recepción de los palpadores, se podrá corregir la medida de la velocidad de onda.

Del análisis de la distancia entre los palpadores se extraen las siguientes rectas de regresión:

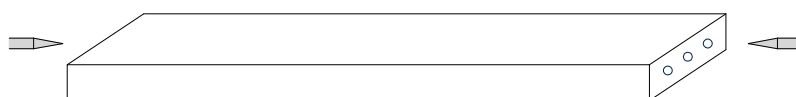
<i>Pinus Sylvestris</i> :	$VI = -1,201 L + 5688,26$	$R^2=0,83$
<i>Pinus Pinaster</i> :	$VI = -1,087 L + 6106,7$	$R^2=0,81$
<i>Pinus Radiata</i> :	$VI = 1,82 L + 5902,1$	$R^2=0,87$

▪ Análisis de la calidad estructural de *Pinus Pinaster* Ait. mediante ultrasonidos.

Para analizar la calidad estructural de la madera de *Pinus Pinaster* Ait. se utilizan diferentes partidas de tamaño estructural sobre las que se determina la geometría de sus piezas así como su clasificación visual en piezas ME-1, ME-2 y rechazo según sus defectos y singularidades cuantificados según los criterios de la norma UNE 56544:2003.

Las propiedades resistentes se establecen a partir de los ensayos mecánicos realizados según la norma UNE EN 408:2004, determinándose los valores de MOR (Módulo de Rotura), MOE (Módulo de Elasticidad Local), MOEG (Módulo de Elasticidad Global) y MOEGTO (Módulo de Elasticidad Global de Canto), realizándose, en todos los casos, las correcciones por humedad y altura de canto necesarias.

Las medidas de ultrasonidos se realizan con un equipo Sylvatest en sentido longitudinal y evitando la médula si estuviese presente en las piezas (Figura IV.20). Los valores obtenidos se corrigen a una humedad de referencia del 12%.



**Figura IV.20.** Mediciones longitudinales situando los palpadores en las testas de las piezas. (Acuña et al., 2006)

## Resultados:

Con los resultados obtenidos, la madera se clasifica en 3 grupos: ME-1 (calidad 1), ME-2 (calidad 2) y rechazo (calidad 3), atendiendo a 4 criterios:

- Clasificación visual según la norma UNE 56544:2003
- Valor del módulo de rotura (MOR)
- Valor del módulo de elasticidad (MOE)
- Clasificación conjunta según el valor del módulo de rotura (MOR) y del módulo de elasticidad (MOE). En esta clasificación, se establece el criterio de asignar "calidad 1" a la pieza que cumple esa condición en ambos casos, la "calidad 2" cuando no se cumple la condición anterior y la pieza no presenta una calidad inferior a 2 en alguna de las dos clasificaciones. Finalmente, la "calidad 3" es asignada a las piezas que en su clasificación por MOR y/o MOE tienen esa calidad.

Los valores asignados para la calidad ME-1 (calidad 1) corresponden a los parámetros resistentes (MOR y MOE) de una madera de clase resistente C24 y para la calidad ME-2 (calidad 2) a una clase resistente C18 de acuerdo con los criterios para el *Pinus Pinaster* de la norma EN 1912. Se prescinde de incluir la densidad como variable clasificadora ya que los resultados que se obtienen están muy por encima de los mínimos exigidos para cada una de las calidades.

De acuerdo con estos principios se obtiene:

1. Según criterios de clasificación visual:

Calidad ME-1 (calidad 1): 9,02%  
 Calidad ME-2 (calidad 2): 27,68%  
 Calidad rechazo (calidad 3): 63,3%

2. Según el valor del módulo de rotura (MOR):

Calidad ME-1 (calidad 1): 70,93%  
 Calidad ME-2 (calidad 2): 14,57%  
 Calidad rechazo (calidad 3): 14,49%

3. Según el valor del módulo de elasticidad (MOE):

Calidad ME-1 (calidad 1): 20,43%  
 Calidad ME-2 (calidad 2): 20,82%  
 Calidad rechazo (calidad 3): 58,75%

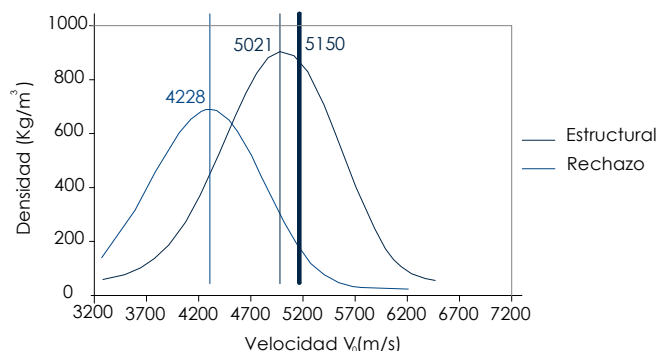
4. Según el valor del módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE):

Calidad ME-1 (calidad 1): 19,89%  
 Calidad ME-2 (calidad 2): 20,74%  
 Calidad rechazo (calidad 3): 59,37%

En cuanto a la relación de cada uno de los grupos atendiendo a las diferentes clasificaciones (visual, por MOR, por MOE, por MOR+MOE) con la velocidad longitudinal de ultrasonidos, se obtiene que las medias de las velocidades de ultrasonidos son significativamente distintas entre los tres grupos de calidad, siendo significativamente más alta la velocidad de clase 1, seguida de la 2 y, por último, la clase rechazada. Este resultado es de esperar por la influencia (retardo en la señal) de los diferentes defectos sobre la velocidad de propagación. No obstante, es destacable que en la clasificación visual no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los grupos ME-2 y rechazo.

Utilizando la clasificación más exigente, MOR+MOE, identificada con la clasificación real y atendiendo al hecho de que la densidad no limita la población, se analizan los valores de

la velocidad de ultrasonidos de los 3 grupos, correspondientes a las clases C24 (ME-1), C18 (ME-2) y rechazo. A partir de estos valores se simplifica la clasificación a dos grupos, estructural (ME-1+ME-2) y rechazo, y se establece un valor de corte de velocidad de ultrasonidos que permite asignar cada pieza al grupo estructural o al grupo rechazado. Para ello se estudian las distribuciones de las poblaciones y se realizan distintas aproximaciones, optando por utilizar para madera estructural el valor  $V_0=5150$  m/s, (Figura IV.21.) coincidente con el valor medio de la población C24.



**Figura IV.21.** Distribución de las poblaciones de calidades reales y determinación de  $V_0$ . (Acuña et al., 2006)

Una vez determinado el valor de corte de la velocidad de ultrasonidos para discernir entre probetas Estructurales y No estructurales se realiza una clasificación en los dos grupos establecidos siguiendo los criterios del método visual y de ultrasonidos. Seguidamente para comprobar el riesgo de utilización de ambos métodos, se estudia las piezas que se han considerado sobreestimadas y subestimadas en cada caso.

Sobreestimadas:

Clasificación visual: 16,6%  
Ultrasonidos: 5,4%

Subestimadas:

Clasificación visual: 30,4%  
Ultrasonidos: 22,8%

Estos resultados ponen de manifiesto que la clasificación realizada utilizando la velocidad de corte  $V_0$ , proporciona una clasificación más ajustada que la clasificación visual. Asimismo, cabe destacar el mayor porcentaje de aciertos, el menor porcentaje de piezas sobrevaloradas y la obtención de alrededor de un 8% menos de piezas subvaloradas.

Otra de las ventajas observadas es que los valores característicos del grupo estructural de ultrasonidos corresponden a una clase resistente C24, mientras que en la clasificación visual esa clase sólo alcanzaría la C22.

En 2006, debido al incremento del uso estructural de la madera de Tali en España (*E. suaveolens* y *E. ivorensis*), **Arriaga et al.** desarrollan un estudio para determinar sus valores característicos de las propiedades físicas y mecánicas. Ambas especies proceden de África y según la bibliografía hay algunas diferencias entre sus propiedades físicas: la *E. suaveolens* tiene una densidad más alta que *E. ivorensis*. Sin embargo, en cuanto a sus propiedades mecánicas no hay diferencias significativas lo que les permite ser utilizadas sin la diferenciación en cuanto a especies u origen.

Para el estudio emplean 82 piezas de tamaño estructural agrupadas en dos tamaños:

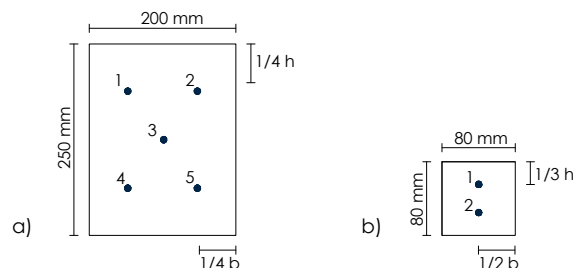
- 200x250 mm de sección transversal y 5 metros de longitud,
- 80x80 mm de sección transversal y 1,6 m de longitud.

Adicionalmente se emplean 79 piezas de la misma especie y procedencia variando su sección y longitud para evaluar el efecto de la longitud en la velocidad de ultrasonidos.

El contenido de humedad de las muestras se evalúa con equipos de resistencia eléctrica según el procedimiento de la UNE EN 13183-2:2002. El contenido de humedad medio de las piezas pequeñas es 14,6% (11,0 a 21,2%) y 25,9% (20,3 a 35,0%) para las piezas mayores.

Las piezas se clasifican de acuerdo con la norma británica para frondosas, la BS 5756:1997 en la que se define una calificación visual única para la Madera Tropical Estructural (HS).

La velocidad de propagación de ultrasonidos se mide usando un equipo Sylvatest. Las medidas se realizan de extremo a extremo de las piezas, tomando varias lecturas dependiendo de la sección transversal de las mismas. Para piezas con grandes secciones transversales, se toman cinco lecturas (Figura IV.22.). El valor asignado a cada pieza es el promedio de todas las lecturas.



**Figura IV.22.** Metodología de medición de la velocidad longitudinal de ultrasonidos en las piezas (a) Piezas de 200x250 mm, b) Piezas de 80x80 mm). (Arriaga, 2006)

Las velocidades obtenidas se corrigen en función del contenido de humedad de las piezas a un valor de referencia del 12%. Para ello se emplea la formulación propuesta por Sandoz en 1989 según la cual cada aumento del 1% del contenido de humedad produce una disminución en la velocidad de aproximadamente 0,8%, con una relación lineal de 5 a 30%.

Las propiedades físicas y mecánicas se obtienen a partir de las metodologías descrita en la UNE EN 408:2003 y de la formulación desarrollada en la UNE EN 384:2004.

- Densidad: se refiere al 12% de humedad.
- Modulo de elasticidad global ( $E_{mg}$ ): se refiere al 12% de humedad.
- Resistencia a la flexión ( $f_m$ ): no se refiere a un contenido de humedad sino que se corrige en función de la altura de sección cuando ésta es menor de 150 mm.

#### Resultados:

Según la clasificación visual el porcentaje de rechazo asciende a un 43%. Las razones principales se centran en la desviación de la fibra y el tamaño de los nudos.

Para explicar este mal resultado, es necesario señalar el hecho de que el alcance de esta norma es demasiado amplio, ya que incluye todas las maderas duras tropicales, y por tanto, no es posible adaptarlo a las condiciones particulares de cada especie.

Como consecuencia del análisis del material clasificado se propone una modificación de las especificaciones de la norma en cuanto a la desviación de la fibra y al tamaño de los nudos. En esta propuesta la desviación de la fibra se limita al 15% en lugar del 9%, mientras que los tamaños de los nudos se limitan sobre el tamaño de las piezas:

- Nudos de cara  $\phi \leq h/2$
- Nudos de borde  $\phi \leq 2b/3$
- Margen nudo y nudo de arista:  $\phi \leq b/2$ . Nudo de margen se define como un nudo de cara situado una distancia igual o inferior al diámetro de nudo, medido desde el borde del nudo a la arista de la pieza).

Esta modificación de las especificaciones de la norma permite una mayor productividad con insignificantes diferencias en los valores de resistencia, permitiendo asignar a las piezas clasificadas una clase resistente D50.

La densidad referida al 12% de humedad presenta unos valores medios de 839,3 kg/m<sup>3</sup> para la madera de Guinea y 931,5 kg/m<sup>3</sup> para la madera de Camerún.

El análisis de la fuerza y la rigidez de todas las piezas arroja valores muy similares para las piezas clasificadas y rechazadas, lo que significa que los criterios de clasificación visual no son lo suficientemente precisos.

De la evaluación de las propiedades mecánicas mediante el empleo de la técnica de ultrasonido se obtienen las siguientes regresiones lineales:

Piezas de 80x80 mm	MOE = 10,08 VI - 36590	R <sup>2</sup> =0,42
Piezas de 200x250 mm	MOE = 6,4216 VI - 10862	R <sup>2</sup> =0,73

Las regresiones obtenidas con la resistencia a flexión arrojan unos coeficientes de regresión muy bajos (0,07 para las piezas de 80x80 mm y 0,12 para las piezas de 200x250 mm).

Del análisis de los resultados de este estudio se puede concluir que existe una buena relación entre la velocidad de ultrasonidos y el módulo de elasticidad. De esto se deriva que es posible utilizar la técnica de ultrasonidos como indicador de la calidad de las piezas. Sin embargo, la débil relación con la tensión de rotura refleja que ésta se debe a defectos locales que tienen más influencia en la resistencia que en la calidad general de las piezas.

Finalmente sobre el efecto de la longitud en la velocidad de ultrasonidos se obtiene que la longitud de la pieza tiene una mayor influencia sobre el valor de velocidad que la sección transversal originando la siguiente recta de regresión:

$$VI = -0,0826 L + 5322,3 \quad R^2=0,78$$

Con ello se deduce que si se emplea los ultrasonidos como técnica de clasificación, el efecto de la longitud de la pieza sobre la velocidad debe que tenerse en cuenta.

En 2007 desde el INIA **Conde García et al.** presentan un trabajo sobre la mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual.

Para el desarrollo de este trabajo se emplean piezas de madera de las dos especies con mayor interés constructivo y más amplia presencia en obras de rehabilitación: el pino silvestre y el pino laricio. La muestra analizada se compone de 1305 piezas de pino silvestre y 852 de pino laricio de varias dimensiones: 100x40/50x2500 mm, 150x40/50/70x3500 mm, 200x50/70x4500 mm. El contenido de humedad de las piezas en el momento de ensayo oscila entre 11-13% determinado mediante xilohigrómetro.

Las piezas se clasifican de acuerdo a la norma UNE 56544:2003 que en su redacción sigue los postulados de las normas UNE EN 14081-1 y UNE EN 1310. De esta clasificación se obtiene para cada norma las siguientes variables:

- d<sub>c</sub>: Diámetro relativo del máximo nudo de cara en % (diámetro nudo dividido entre la anchura de cara de la pieza).
- d<sub>h</sub>: Diámetro relativo del máximo nudo de canto en % (diámetro nudo dividido entre el espesor de la pieza).

Las medidas de velocidad de ultrasonidos se realizan mediante el método directo empleando dos palpadores (uno emisor y otro receptor) y un equipo Sylvatest Duo que trabaja en la frecuencia de 22 kHz.



Los ensayos mecánicos de rotura a flexión se realizan en un pórtico de ensayos Ibertest siguiendo la metodología descrita en la norma UNE EN 408. De cada ensayo se obtiene:

- Tensión de rotura a flexión (MOR) en N/mm<sup>2</sup>.
- Módulo de elasticidad global en N/mm<sup>2</sup> medido en la línea neutra (E<sub>g</sub>).

Resultados:

Con todos los datos de los ensayos realizados se aplican técnicas de análisis de regresión con modelos lineales. Como variables independientes se emplean las siguientes:

- Velocidad de transmisión de la onda ultrasónica de cada viga en m/s.
- Diámetro relativo del mayor nudo de cara (d<sub>c</sub>) en tantos por uno.
- Diámetro relativo del mayor nudo de canto (d<sub>h</sub>) en tantos por uno.
- Valor de la densidad (d) en kg/m<sup>3</sup>.
- Longitud de la viga (l) en mm.

Como variables dependientes se emplean el valor de tensión de rotura a flexión (MOR) y el del módulo de elasticidad (E<sub>g</sub>), obtenidos del ensayo mecánico y expresados en N/mm<sup>2</sup>.

Para analizar la influencia de cada variable independiente en el modelo predictivo del MOR y E<sub>g</sub>, se realiza un ajuste, por regresión, de modelos lineales. Finalmente, se obtiene que al complementar la velocidad longitudinal (V<sub>silv</sub>) con las variables adicionales basadas en mediciones cualitativas (d<sub>h</sub>, d<sub>c</sub>) y físicas (l, d) efectuadas sobre el material las correlaciones mejoran considerablemente.

La evaluación del diámetro del nudo de canto (d<sub>h</sub>) tiene un efecto significativo en las dos variables (MOR, E<sub>g</sub>), mientras que el diámetro del nudo de cara (d<sub>c</sub>) sólo tiene efecto significativo en la predicción de la resistencia (MOR). Este comportamiento puede atribuirse al diferente efecto que las desviaciones locales de fibras, debidas a la presencia de los nudos (en la cara o en el canto), producen en la resistencia y elasticidad de la madera sometida a flexión. La adición de la densidad mejora notablemente los modelos.

El efecto de la longitud en algunos de los modelos sugiere un problema de atenuación de la onda con la longitud del elemento a medir. La longitud es una variable que implícitamente forma parte de la medida de la velocidad de transmisión de la onda.

Por otro lado, se deduce que, según los valores de los coeficientes de determinación, la técnica de ultrasonidos resulta más eficaz en la predicción del comportamiento elástico de la madera que en la predicción de la resistencia.

Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L):

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= -51,8232 + 0,0156779 \cdot V_{\text{silv}} - 17,027 \cdot d_c - 19,5393 \cdot d_h - 0,00207201 \cdot L + 0,0744176 \cdot d + 10,7 \\ E_g &= -12465,8 + 3,16324 \cdot V_{\text{silv}} - 1009,53 \cdot d_h - 0,208585 \cdot L + 13,8258 \cdot d + 1250,5 \end{aligned}$$

Pino laricio (*Pinus nigra* Arnold):

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= -63,5851 + 0,0203009 \cdot V_{\text{silv}} - 13,3613 \cdot d_c - 21,5019 \cdot d_h - 0,0081278 \cdot L + 0,0915088 \cdot d + 12,0 \\ E_g &= -16568,4 + 4,16592 \cdot V_{\text{silv}} - 1242,14 \cdot d_h - 0,19773 \cdot L + 14,9703 \cdot d + 1460,8 \end{aligned}$$

Ambas especies:

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= -50,0276 + 0,016988 \cdot V_{\text{silv}} - 16,7471 \cdot d_c - 21,3532 \cdot d_h - 0,00454516 \cdot L + 0,0772907 \cdot d + 11,4 \\ E_g &= -13355,0 + 3,50204 \cdot V_{\text{silv}} - 1242,65 \cdot d_h + 13,9503 \cdot d + 1367,4 \end{aligned}$$

La comparación entre sí de los modelos obtenidos para cada especie y para el global de ambas permite concluir que, sin merma significativa en la calidad de la predicción, es posible emplear un único modelo para ambas especies, lo que simplifica enormemente su empleo en obra, ya que las dos especies consideradas, siendo muy comunes en obras de rehabilitación en España, son en la práctica indistinguibles anatómicamente.



La principal conclusión que se puede extraer de todos los trabajos expuestos es que la técnica de ultrasonidos se perfila como una técnica adecuada para la evaluación no destructiva de la calidad de la madera mediante la predicción del módulo de elasticidad de las piezas. Esta técnica puede emplearse como una técnica complementaria a la clasificación visual empleada actualmente permitiendo obtener mejores rendimientos clasificatorios. Aún así, ambas técnicas son conservadoras lo que permite elevar el nivel de confianza sobre las mismas.

Asimismo, la técnica de ultrasonidos permite estimar las propiedades mecánicas de la madera (resistencia a flexión, a compresión y a tracción) mediante las correlaciones obtenidas previamente en laboratorio mediante ensayos mecánicos. Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos en estas correlaciones mejoran al ser combinados con parámetros de clasificación visual y la densidad. Aún así, debe señalarse que la eficacia de la técnica es mayor en la predicción del módulo de elasticidad que en la predicción de la resistencia.

Por otro lado, queda demostrado, según los numerosos estudios llevados a cabo por diferentes autores, que la técnica de ultrasonidos está afectada por multitud de factores:

- Estructura del material: especie de madera y su densidad
- Defectos
- Humedad
- Temperatura
- Posición fibra
- Longitud y sección transversal de las piezas

La influencia de cada uno de estos parámetros sobre la velocidad de ultrasonidos debe ser estudiada individualmente. Solo de este modo, se pueden extraer las correlaciones y los coeficientes de ajuste necesarios que permiten, en cada situación, referir las lecturas de las velocidades de transmisión de la onda ultrasónica a unos valores de referencia y comparar los resultados obtenidos con independencia de las condiciones en las que son realizadas las mediciones.

### Notas del capítulo:

#### Libros

Bucur, V. "Acoustics of wood". SPRINGER (2006). 452 págs. ISBN: 9783540305941.

Rodríguez Liñán, C, Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Sevilla. Universidad de Sevilla (2000). 165 págs. ISBN: 8447206572.

#### Tesis doctorales

Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

Hermoso, E. "Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L". Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2001).

Esteban Herrero, M. "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera". Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2003).

Iñiguez González, G. "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas estructural de gran escuadría para uso estructural". Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2007).

Sandoz, J.L. "Triage et Fiabilité des bois de construction. Validité de la methode ultrason". Ecole Polytechnique Federale de Lausana (1990).

#### Artículos

Acuña, L., Díez, M.R., Casado, M. "Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus Pinaster Ait*". *Boletín del CIDEU. Comunicación invitada*. ISSN: 1885-5237. Vol. 2. (2006). pp. 7-26.

Acuña, L., Renedo, F., Casado, M., Lázaro, T. "Efecto de la procedencia de la madera estructural de *Pinus Pinaster Ait*. en la clasificación mediante la técnica de ultrasonidos".

Aggour, M. S., Ragab, A.M., E.J. White J.R. "Determination of In-Place Timber Piling Strenght". *Transportation Research Record*. N° 962. (1984). pp. 69-77.

Arita, K., Kuratani, K. "Wooden Pole Tester for Determining Strength f Decayed Wooden Poles". *Journal Transportation Research*. July (1984). pp. 167-173.

Arriaga, F. Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J.I. "Structural Tali Timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods". *Holz als roh-und werkstoff*. Vol. 64. (2006). pp. 357-362.

Arriaga, F. et al. "Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera". *Revista AITIM*. N° 161. Noviembre (1992). pp. 51-59.

Beall, F.C. "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties". *Wood science and technology*. Vol. 36. (2002). pp. 197-212.

Beall, F.C., Biernacki, J.M., Lemaster, R.L. The use of acousto-ultrasonics to detect biodeterioration in utility poles. *Journal Acoustic Emission*. Vol. 12. (1994). pp. 55-64.

Bucur, V. "Acoustics as a tool for the nondestructive testing of wood". *NDT*. Vol. 4. N°11. Noviembre (1999). pp. 22-26.

Conde García, M., Fernández-Golfín Seco J.I., Hermoso Prieto, E. "Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual". *Materiales de la Construcción*. Vol. 57. N° 288. Madrid, Octubre-Diciembre (2007). pp. 49-59.

Feeney, F.E, Chivers, R.C., Evertsen J.A., Keating, J. "The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood". *Ultrasonics*. Vol. 36. (1998). pp. 449-453.

Goia R. de Oliveira, F., Anadia O. de Campos, J., Sales, A. "Ultrasonic Measurements in Brazilian Hardwood". *Materials Research*. Vol. 5. N° 1. Sao Carlos, January-March (2002). DOI: 10.1590/S1516-14392002000100009.

Hermoso Prieto, E., Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M., Mier Pérez, R. "Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. Madrid, Abril-Junio (2007). pp. 87-95.

Kabir, M.F. "Prediction of ultrasonic properties from grain angle". *Journal of the Institute of Wood Science*. Vol. 15. Nº 5. Summer (2001). ISSN 0020-3203.

Kabir, M., Schmoldt, D., Araman, P., Schafer, M. "Classifying defects in pallet stringers by ultrasonic scanning". *Wood and fiber science*. Vol. 35. Nº 3. (2003). pp. 341-350.

Kamioka H. "Effects of Ultrasonic Bonding Material on Velocity and Attenuation of Sound in Red Lavan Wood". *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. XXVII. Nº 2 (1988). pp. 188-191.

Kazemi Najafi, S., Abbasi Marasht, A., Ebrahimi, G. "Prediction of ultrasonic wave velocity in particleboard and fiberboard". *Journal Materials Science*. Vol. 42. January (2007). pp. 789-793. DOI 10.1007/s10853-006-1454-0.

Laffarga Ostert, J. "Aplicación de la propagación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas".

Lourenço, P., Feio, A., Saporiti Machado, J. "Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: non-destructive correlations for test results in new and old wood". *Construction and Building Materials*. Vol. 21 (2007). pp. 1617-1627.

Rajeshwar, B., Bender, D.A., Bray, D.E., McDonald, K.A. "An Ultrasonic Technique for Predicting Tensile Strength of Southern Pine Lumber". *American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 40. Nº 4. (1997). pp. 1153-1159.

Sandoz, J.L. "Grading of construction timber by ultrasound". *Wood science and technology*. Vol. 23. (1989). pp. 95-108.

Sandoz, J.L. "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading". *Wood science and technology*. Vol. 27. (1993). pp. 373-380.

Tomikawa, Y. et al. "Non Destructive Inspection of Rotted Termite Damage Wooden Poles by Ultrasound". *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. XXIV. Supplement 24-1. (1984). pp. 187-189.

Wayne, W., Wilcox, W. "Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity". *Forest Products Journal*. Vol. XXXIV. Nº 5. (1988). pp. 68-73.

Yang, Y., Hee, K., Hsu, D., Kim, S., Soug, S., Cho, H., Park, J., Kim, Y. "On Nondestructive Evaluation of Wood Materials Using Ultrasonic Techniques". *Key Engineering Materials*. Vol. 297-300. Switzerland, November (2005). pp. 1973-1978.

## Congresos

Aggour, M. S. et al. "Nondestructive Evaluation of Timber Bridge Piles". *Conference Nº 08784. Structures Congress. New Orleans. 15-18 September 1986*. ASCE, New York USA (1986). pp. 82-95.

Lee I.D.G. "Testing for Safety in Timber Structures Paper 12". *Symposium of Nondestructive Testing of Concrete and Timber*. Inst. of Civil Engineers London (1969). pp. 115-118.

Navarrete, A. , Troya, M.T. "Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques". *25<sup>th</sup> Annual Meeting Bali, Indonesia*. 30 May-3 June 1994.

Palaia, L., Galvan, V. et al. "Estimación de la residencia de la madera en edificios antiguos por medio de técnicas ultrasónicas". *Primer Congreso Nacional de Tecnología en la Arquitectura*. E.T.S.A. de Madrid. Noviembre de 1994.

Sandoz, J.L. "Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications". *10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Lausanne CH. 26-28 Septiembre de 1996.

Bertoldo, C. "Assessment of wood quality by tree evaluation using ultrasound". *XIV World Forestry Congress*. Buenos Aires. 18-23 Octubre de 2009.

Dzbencki, W. "Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees". *COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products*. Warsaw. 15-17 Octubre de 2007.

Sandoz, J.L. "Non destructive evaluation of building timber by ultrasound". *8th International Non Destructive Testing of Wood Symposium*. Vancouver, WA, USA. 23-25 Septiembre de 1991.

## ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Sandoz, J.L. "Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing". *9th International Non Destructive Testing of Wood Symposium*. Madison, WI, USA. 22-24 Septiembre de 1993.

Sandoz J.L. "Timber log grading using ultrasound, the Swiss example". *11th International Symposium on NDT of Wood*. Madison, WI, USA. 9-11 Septiembre de 1998.

Vary, A. The Acousto-Ultrasonic Approach, Acousto-Ultrasonics, theory and Application, J. C. Duke, Jr.Ed., Virg. Polytech. Inst. and State University, Blacksburg, Virginia. 1987.

### IV.1.3. LA TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS APLICADA A LA MADERA

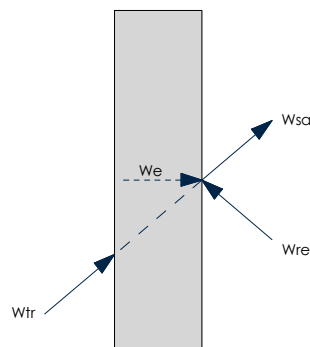
Basada en el principio de transmisión de calor por radiación, la termografía es un "sistema" que permite el estudio de los cuerpos desde una cierta distancia fundamentándose en la distribución de calor a través del tiempo en los mismos. La velocidad (la diferencia genera contraste) de calentamiento o enfriamiento depende de las propiedades térmicas, estado físico, tamaño y naturaleza del producto, así como el mecanismo de transferencia. La Física logra obtener, a partir de esa energía radiada en el rango infrarrojo (0,7 a 15 micras), la temperatura del cuerpo emisor. Esto se logra midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas.

Esta energía radiada en el rango de infrarrojos desde un cuerpo será la suma de tres componentes: radiación emitida, reflejada y transmitida (Figura IV.23.). Según Kirchoff la suma de estas tres constantes, en una longitud de onda dada, es igual a la unidad.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

donde;

- $\varepsilon$  Emisividad de la superficie del cuerpo
- $\rho$  Reflectividad de la superficie del cuerpo
- $\tau$  Transmisividad de la superficie del cuerpo



**Figura IV.23.** Energía radiada en el rango de infrarrojos desde un cuerpo. (Elaboración propia)

Dado que muchos cuerpos son opacos a la radiación infrarroja, luego:

$$1 = \varepsilon + \rho$$

El empleo de la termografía como herramienta de inspección se basa en el uso de dos técnicas. La elección de uno u otro método dependerá de la naturaleza del material a verificar:

- Termografía pasiva. En la termografía pasiva no se aplica ninguna estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para provocar un flujo de calor en el cuerpo inspeccionado. El objeto estudiado produce un patrón de temperaturas por el hecho de estar involucrado en un proceso que genera calor. Unos grados de diferencia respecto a la temperatura normal de trabajo, tomada como referencia, muestran un comportamiento inusual. La termografía capta esta información sin necesidad de interacción con el cuerpo.
- Termografía activa. El operador produce una estimulación del sistema observado con el objetivo de identificar parámetros del mismo a través de un análisis comparativo de los estados antes y después de la estimulación. Un defecto interno afectaría al flujo calorífico produciendo un contraste térmico en la superficie.

El uso de la termografía en la madera es relativamente reciente. Las primeras investigaciones sobre la aplicabilidad de este método en este material se centran en la Universidad de Stuttgart, Alemania. **Busse et al.**, dentro del Instituto para la Ciencia y Evaluación de Polímeros, inician unos estudios pioneros empleando este nuevo método de evaluación no destructiva sobre polímeros y compuestos de madera (1988, 1994, 2001).

Las propiedades térmicas de la madera, baja conductividad térmica y difusividad, hacen que sea necesario emplear una fuente externa de calor para provocar un flujo de energía en el cuerpo inspeccionado. Es lo que se ha denominado termografía activa. El objetivo es poder identificar parámetros de la muestra a través de un análisis comparativo del estado previo y tras la estimulación.

A pesar de estas limitaciones, se ha estudiado la aplicabilidad de la termografía en diferentes situaciones:

- Localización de estados tensionales de agotamiento
- Detección de humedades
- Control de calidad de acabados
- Detección de defectos internos
- Detección de termitas

El éxito de la técnica no ha sido probado en todas las casuísticas. A continuación exponemos los trabajos de investigación más relevantes desarrollados en cada área.

### **IV.1.3.1. La termografía como técnica de localización de estados tensionales de agotamiento**

En 1995, **Masuda**, y en 1998, **Masuda y Takahashi** realizan los primeros estudios estimulando las muestras con el objetivo de provocar un flujo de calor que permitiese establecer un análisis comparativo antes y después de la estimulación. El procedimiento empleado consiste en aplicar una carga cíclica a una muestra, flexión o compresión, consiguiendo un incremento de temperatura relacionado con el estrés del material.

Siguiendo esta línea de trabajo, en 1996, **Luong** analiza el comportamiento mecánico de la madera. Para ello utiliza tres muestras de madera de pino, cortadas cada una de ellas en una dirección (longitudinal, radial y transversal) y ensanchando sus bases para evitar su movimiento o pandeo causado por la heterogeneidad del material o por la excentricidad de la carga de compresión aplicada (Figura IV.24).



**Figura IV.24.** Probetas empleadas para el ensayo de carga. (Luong,1996).

Resultados:

Los resultados obtenidos con la termografía permiten detectar en cada caso la localización de la disipación de la energía que pone en aviso sobre el mecanismo de rotura de cada muestra (Figura IV.25). La ventaja que puede presentar este tipo de

estimulación es que cualquier defecto mecánico de la pieza puede detectarse con gran rapidez y facilidad. No obstante, este proceso de carga y descarga puede producir un deterioro de la pieza que antes no existiera.

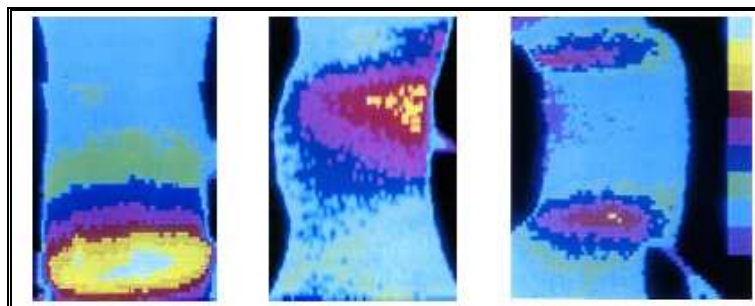


Figura IV.25. Imágenes infrarrojas del ensayo. (Luong, 1996).

#### **IV.1.3.2. La termografía como técnica de detección de humedades**

En 1999, **J. Abedi y S. Banerjee** presentan desde el Instituto para la Ciencia y Tecnología del Papel en Atlanta (Georgia) un estudio en el que emplean la termografía para determinar el mapeo de humedad durante el secado de la madera.

En este estudio trabajan con un parámetro, el coeficiente de variación (COV) de la temperatura de la superficie que refleja las propiedades de la zona mojada. Cuando la madera se seca, el coeficiente de variación se incrementa gradualmente, la película de agua de la superficie se rompe y la humedad penetra al interior de la madera. La relación entre el coeficiente de variación y el contenido de humedad depende los factores como el tipo de acabado, la especie de la madera y la temperatura de secado.

Para los ensayos emplean probetas de pino y álamo, cortadas en dimensiones de 12,7x8,9x0,42 cm. Se les determina la humedad y se secan en una estufa dejando la puerta abierta para permitir la toma de imágenes con la cámara termográfica situada a 50 cm. Las longitudes de onda del detector oscilan entre 2-5,4  $\mu$ , donde la temperatura es la única variable y se introduce un valor de emisividad para la madera de 0,92.

Se toman imágenes cada minuto y, finalmente, se pesan las probetas para determinar la pérdida de humedad.

Resultados:

Los resultados más significativos de este estudio es que la relación entre el contenido de humedad y la temperatura de la madera es lineal en las dos especies ensayadas. Conforme aumenta la temperatura disminuye su contenido de humedad. La pendiente de la recta obtenida en ambas especies es paralela con una diferencia de temperatura de 1,7 °C (Figura IV.26).

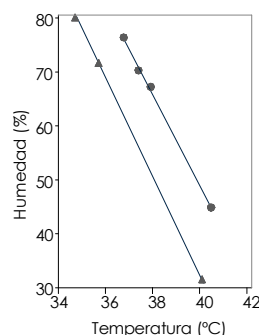


Figura IV.26. Temperatura superficial en función del grado de humedad para el pino. (J. Abedi y S. Banerjee, 1999)

En 2004, desde el Departamento de Historia y Conservación de la Arquitectura en la Universidad Politécnica en Milán se presenta un estudio sobre el empleo de la termografía en madera. **Ludwig et al.** tienen en cuenta que el mejor método de análisis para evaluar los defectos y daños en los materiales arquitectónicos es el análisis visual pero, dado que siempre esto no es posible, tratan de buscar en la termografía un método alternativo para inspeccionar áreas con riesgo de daño o para localizar áreas ya dañadas. Para ello manejan la medida de humedad en una madera como factor que puede indicar donde se localiza el daño o donde podría localizarse en un futuro. Parten de que la medida del contenido de humedad en un solo punto de la zona analizada es válida para toda el área que tenga la misma temperatura. Así solo deben tomarse unas pocas medidas para definir los contenidos de humedad que corresponde a una temperatura de superficie dada. Parten de la hipótesis de que grandes cantidades de agua contenida puede modificar en gran medida los parámetros térmicos (densidad, calor específico y conductividad térmica) del material, y por tanto, la termografía activa sería el método de análisis más efectivo para la investigación en madera.

Para medir la humedad Ludwig et al. comparan el incremento de la temperatura después de aplicar una fuente de calor homogénea. El agua difusa en las fibras de la madera causa un incremento del calor específico del material, conductividad térmica y la densidad. La dependencia de estos tres parámetros sobre el agua contenida se expresa:

$$C_p = \frac{C_{p_d} + W C_{p_w}}{1 + W} \quad K = \frac{K_d + W K_w}{1 + W} \quad \rho = \rho_d(1 + W)$$

En el caso de un flujo de calor constante, la temperatura de la superficie varía:

$$T = T_0 + \frac{Q \sqrt{t}}{\sqrt{\pi k \rho C_p}}$$

Por tanto;

$$T - T_0 = m \sqrt{t}$$

donde;

$$m = \frac{2Q}{e \sqrt{\pi}}$$

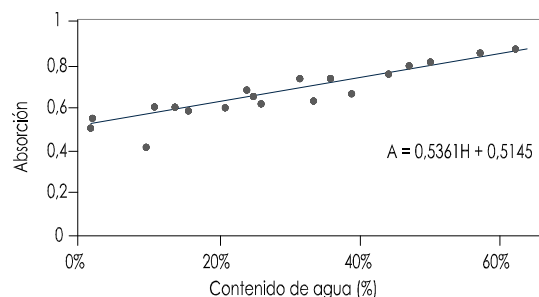
y ;

$$e = \sqrt{k \rho C_p}$$

representa la difusividad térmica.

La tendencia de la temperatura basada en datos experimentales permite calcular m.

El método es sensible a la cantidad de calor absorbido, que está correlacionado con el coeficiente angular, m. La presencia de agua varía el coeficiente de absorción de la radiación (Figura IV.27.).



**Figura IV.27.** Variación de la absorción de las muestras de pino en función del contenido de humedad. (Ludwig et al., 2004)



No obstante, el método presentado debe tener en cuenta una serie de correcciones:

1. Efecto de la evaporación en las medidas de la temperatura.

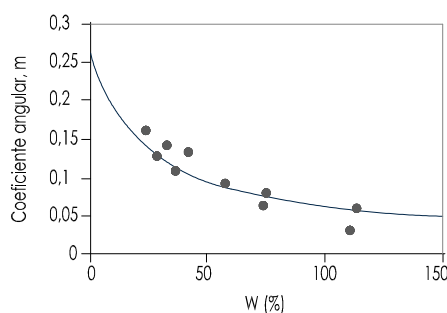
Los análisis termográficos pueden mostrar zonas frías homogéneas afectadas por el alto valor del flujo de evaporación. En el caso de la madera los valores de evaporación son muy bajos aunque la concentración de agua sea grande. Para un contenido de agua entre el 12 y el 25% los valores de evaporación son aproximadamente de  $10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$ , por lo tanto, el enfriamiento debido a esta evaporación produce una señal muy baja (sobre  $0,5^\circ\text{C}$ ) que puede ser enmascarado por otros efectos térmicos. Los valores del flujo de evaporación pueden ser detectados por la termografía en valores superiores a  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$  que corresponde a enfriamientos de  $2\text{-}3^\circ\text{C}$  dependiendo de las características del material.

2. Efecto de la reflexión en las medidas de la temperatura.

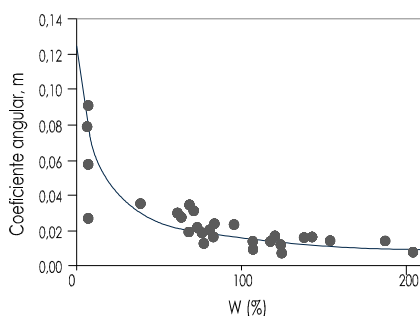
En la termografía activa, durante la fase de calentamiento, se supone que las lámparas emiten la mayor parte de la radiación cerca del espectro de infrarrojos ( $0,7\text{-}5 \mu\text{m}$ ). Sin embargo, si la bombilla de filamento se comporta como un cuerpo negro, el vaso de la bombilla podría fácilmente sobrepasar los  $100^\circ\text{C}$ , provocando una intensa emisión en la medida de infrarrojos. Por lo tanto, el foco de emisión es la fuente de un gran ruido mientras se realiza la captura de los termogramas. Este efecto lleva a un aumento de la temperatura (alrededor de  $2^\circ\text{C}$ ). Para evitar este efecto, se coloca un filtro de vidrio (4 mm de espesor) entre la luz y la muestra durante el calentamiento.

Resultados:

Los resultados de este trabajo se centran en la variación del coeficiente angular  $m$ , después de 10 minutos de calentamiento para diferentes contenidos de agua en las muestras de pino (Figura IV.28.) y en una viga de pino de una cubierta del siglo XIX (Figura IV.29.). En esta última solo se empapó un extremo y por tanto el desigual humedecimiento produjo una alta variedad de humedad contenida. La muestra se sitúa frente a la cámara con las fibras orientadas verticalmente. El calentamiento se realiza a partir de una lámpara de 250 W y a una distancia de un metro. Los termogramas se toman cada 30 segundos durante 10 minutos.

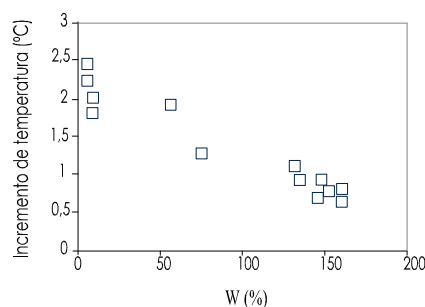


**Figura IV.28.** Coeficiente angular del incremento de temperatura sobre muestras de pino con diferentes contenidos de humedad. (Ludwig et al., 2004)



**Figura IV.29.** Coeficiente angular del incremento de temperatura sobre una viga de pino con diferentes contenidos de humedad. (Ludwig et al., 2004)

El campo de aplicación de esta técnica demuestra que el factor clave es la disponibilidad de una adecuada fuente de calor. Para resolver este problema Ludwig et al. desarrollan un sistema de luz concentrada. Esto permite irradiar pequeñas áreas sin contacto por medio de un fino y un potente haz. Esto se aplica a la misma viga de pino de la prueba anterior. Para ello se ilumina fragmentos (5 x 0,2 cm, 50 vatios) durante 3s en varios puntos de la viga. Para capturar las imágenes térmicas usan una cámara microbolométrica (8-12  $\mu\text{m}$ ) a 25 Hz. Los estudios muestran la correlación existente entre el incremento de temperatura y el contenido de agua (Figura IV.30.).



**Figura IV.30.** Incremento de temperatura en una viga de roble al calentar con el haz en función de la humedad. (Ludwig et al., 2004)

#### Conclusiones:

En esta investigación se determina que el procedimiento de infrarrojos es un método adecuado para detectar áreas de humedad. A partir de un mapa de temperaturas se pretende localizar áreas con diferentes contenidos de humedad de una forma rápida y no destructiva a partir de una formulación matemática. Se obtiene un coeficiente angular,  $m$ , que relaciona la densidad, el calor específico y la conductividad térmica en función de la humedad con el incremento de temperatura. Asimismo, la termografía activa se perfila como la técnica más apropiada para el empleo en madera. El problema de la termografía activa radica en la técnica de calentamiento para su aplicación in situ. En esta investigación Ludwig et al. desarrollan un método basado en un haz concentrado de calor que permite estimular pequeñas áreas. No obstante, el inconveniente que presenta esta técnica es que los resultados solo pueden aplicarse a unos pocos milímetros desde la superficie por lo que es complicado relacionarlo con el deterioro interior.

#### **IV.1.3.3. La termografía como técnica de control de calidad**

En 1999, **Mattone M.** desde el Departamento de Arquitectura en Turín (Italia) lleva a cabo una investigación sobre posibles métodos no destructivos para la evaluación del estado de conservación de intervenciones anteriores sobre estructuras de madera. La importancia de esta investigación radica en que, desde la segunda mitad de los años setenta, se han realizado numerosas intervenciones con el objetivo de consolidar estructuras de madera deterioradas. Las partes dañadas, se han sustituido por prótesis de epoxi microhormigón, combinado con fibra de vidrio o de plástico reforzado con barras de acero.

La conexión entre la estructura existente y la prótesis se realiza por medio de barras fijadas a la madera mediante adhesivos epoxi. La eficacia de la intervención depende esencialmente del grado de colaboración entre el elemento de madera y la prótesis, algo que no sucede siempre ya que las características de los materiales son distintas. Las prótesis al ser de hormigón tienen una menor deformabilidad y un comportamiento distinto frente a la humedad y a la temperatura. Sin embargo, este fenómeno no menoscaba la eficacia estática de la intervención, siempre que la relación entre la madera y la prótesis sea garantizada por las barras. Sobre estas consideraciones, se estima conveniente desarrollar un método de ensayo no destructivo para ser utilizado in situ con el fin de evaluar los efectos a largo plazo de estas intervenciones y para comprobar la presencia de discontinuidades entre las barras y la madera.

Se preparan muestras a pequeña escala consistentes en pequeñas vigas de roble en las que se introducen barras de 14 mm (de fibra de vidrio reforzado o de acero) y se hacen integrales mediante un pegamento a base de epoxi (Resisystem 310 TX).

Muestra	Sección (mm)	
1v	14x18,3	Con barra fibra de vidrio reforzada más de la mitad su longitud
2v	10x12	Con barra fibra de vidrio reforzada toda su longitud
3v	10x12	Con barra fibra de vidrio reforzada algunos tramos
4	10x12	Con barra de acero (Ø16 mm)
1a	10x12	Con barra de acero reforzada más de la mitad de su longitud
2a	10x12	Con barra de acero reforzada su longitud completa

Los equipos que se utilizan para los ensayos son:

- Medición de la velocidad de onda (ultrasonidos)
- Rayos X
- Termografía

El uso de la termografía vino propiciado por un análisis de la bibliografía consultada que origina una necesidad de estudiar la aplicabilidad de las pruebas termográficas en la evaluación de discontinuidades dentro de las estructuras de madera.

Para los ensayos con termografía se sometieron las muestras a un proceso de calentamiento prolongado debido a la mala conductividad térmica de la madera y se tomaron imágenes termográficas.

Resultados:

Los resultados obtenidos en estos ensayos en lo referente a la termografía no proporcionan unos resultados alentadores. Resulta imposible identificar cualquier discontinuidad entre las barras y la madera o incluso discernir con suficiente certeza la presencia de éstas.

En 2005, en el Simposio Internacional de técnicas no destructivas de la Madera de Hannover (Alemania), **Meinlschmidt** presenta un estudio sobre la aplicación de la termografía como técnica de control de calidad en los procesos productivos. El objetivo es localizar los defectos en la madera y los materiales basados en ésta.

Meinlschmidt subraya que hoy día las técnicas de producción alcanzan una alta calidad y un alto rendimiento por lo que es necesario incorporar un método rápido para detectar los defectos de los materiales. La termografía se presenta como una herramienta eficaz, capaz de inspeccionar grandes áreas sin establecer contacto y en un corto espacio de tiempo. Dentro de la termografía Meinlschmidt plantea el uso tanto de la termografía activa, calentando el material, como de la termografía pasiva aprovechando la energía del proceso de producción.

Meinlschmidt señala que si se emplea la termografía activa la temperatura del material subirá y posteriormente, en el proceso de disipación de este calor, se pondrá de manifiesto la presencia de un defecto por debajo de la superficie ya que se crea una barrera en el proceso de difusión y por tanto, la temperatura de la superficie sobre el defecto bajará más lentamente que en otras regiones. La superficie por encima del defecto mostrará un punto caliente durante más tiempo que el resto de la superficie. En la madera este proceso de detección de defectos puede ser lento dependiendo de la profundidad del defecto.

Si, por el contrario, se emplea la termografía pasiva aprovechando la energía que se produce en el proceso de producción, los defectos invisibles en el material aparecen como manchas en la superficie.

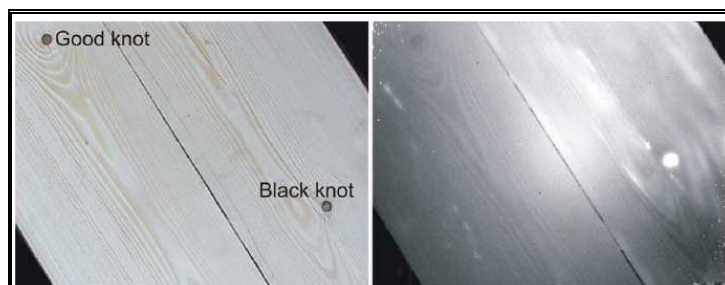
En ambos casos, activa o pasiva, los defectos se detectan. En la termografía activa como manchas calientes y en la termografía pasiva como manchas frías.

Metodología:

En la termografía activa Meinschmidt sitúa el material de inspección en una banda transportadora con una velocidad de 50 m/min y lo calienta mediante 3 radiadores de forma homogénea. La cámara se sitúa sobre la cinta grabando la temperatura de la superficie. Esta cámara tiene una resolución de: 384 x 288 píxel y una longitud de onda 3,5-5  $\mu$ .

Resultados:

Los ensayos se realizan con espesores de 3 a 38 mm. Se detectan defectos tanto visibles, nudos (distinguiéndose si eran o no nudos saltadizos), diferenciación de los anillos de crecimiento, así como defectos invisibles de laminado y deficiencias de encolado (Figura IV.31.).



**Figura IV.31.** Distinción a través de la termografía de nudos saltadizos. (Meinschmidt, 2005)

En 2006, **Niemz P.** publica en "Wood Physics" donde presenta un capítulo en el que se recogen los métodos no destructivos para la inspección en madera. En ellos se hace referencia a la termografía y señala que es un método que permite la detección de defectos de 1 mm de profundidad y las laminaciones de la superficie.

### **IV.1.3.4. La termografía como técnica de detección de defectos internos**

En el año 2000 **T. Tanaka** presenta un trabajo en el 12 Simposio Internacional sobre Técnicas No destructivas de la Madera. En este trabajo, Tanaka presenta la termografía como una técnica de inspección de la madera de fácil aplicación, no destructiva y que permite analizar grandes áreas. Con ello pretende diagnosticar con el paso del tiempo la madera que forma parte de las estructuras.

Tanaka parte de que las propiedades térmicas que intervienen en una inspección termográfica son el calor específico, la conductividad y la difusividad térmica. Extrae las ecuaciones que definen estos parámetros de la "Concise Encyclopedia of Wood and Wood based Materials (1989)". El calor específico ( $c$ ) del material se define:

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}$$

donde  $Q$  es la energía necesaria para cambiar el cuerpo de la temperatura  $T_1$  a  $T_2$  y  $m$  la masa del cuerpo. El calor específico de la madera es independiente de la especie de madera y de la densidad pero varía con el contenido de humedad. El calor específico de la madera seca es:

$$c_0 = 1,114 + 0,0046T \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right)$$

y para la madera con  $u\%$  de humedad:

$$c_u = \frac{4,19u + 1,114 + 0,0046T}{1+u} \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right)$$

En el caso de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) varía con la densidad, con los defectos y con la humedad. La conductividad para la dirección perpendicular a la fibra es dada por Kollmann(1968) para un rango de densidad de 200 a 800 Kg/m<sup>3</sup> y un contenido de humedad de 12%:

$$\lambda = 0,000195\rho + 0,025 \left( \frac{W}{\text{m}^\circ\text{C}} \right)$$

Usando la siguiente expresión y para los diferentes contenidos de humedad desde 5 a 35%:

$$\lambda_2 = \lambda_1(1 - 0,015(u_1 - u_2))$$

En la dirección de la fibra en la madera seca el calor se conduce 2,5 veces más rápido que en la dirección transversal. Esta diferencia para la madera húmeda es solo 1,5. El cociente de la conductividad radial a tangencial es 1,3 a 0,9.

La influencia de la densidad y del contenido de humedad en la difusividad toma los siguientes valores:

	$\rho$ 200 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ 400 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ 600 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ 800 kg/m <sup>3</sup>
U 10%	$1,89 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$
U 20%	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,47 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$
U 30%	$1,64 \cdot 10^{-7}$	$1,39 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$
U 50%	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$
U 100%	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	-----

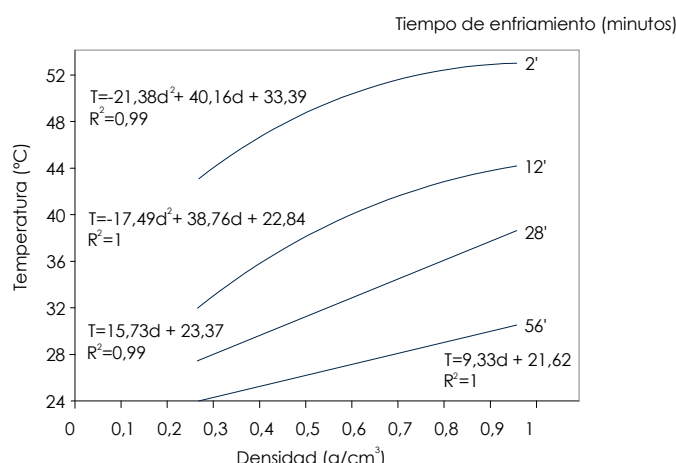
▪ Temperatura superficial, efecto de la densidad.

Heisler definió que la temperatura superficial no depende solo del tiempo, de la madera, de la temperatura del aire y de la difusividad sino que depende también de la conductividad del calor y como la conductividad depende de la densidad, la temperatura de la superficie depende de la densidad también. Este es un hecho importante para nuestra investigación dado que la madera deteriorada tiene menos densidad que la madera intacta.

Para verificar estos resultados Tanaka realiza una serie de ensayos con diferentes especies. La dimensión de las probetas es de 10x8x2 cm y su contenido de humedad del 12%.

Nombre Japonés	Nombre Científico	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Kiri	Paulownia tomentosa Steud.	265
Sugi	Cryptomeria japonica D.Don	367
Beimatsu	Pseudotsuga menziesii Franco	530
Buna	Fagus crenata Bl.	576
Apitong	Quercus acuta Thunb.	727
Aka-gashi	Dipterocarpus gracilis Bl.	948

Las muestras se calientan en un horno a 60 °C y el enfriamiento se capta por la termografía. La temperatura del aire es 22 °C. La cámara es de la marca Avio con una sensibilidad térmica es de 0,01 °C. La resolución de la imagen es 100x256 píxel (Figura IV.32.).



**Figura IV.32.** Temperatura superficial de seis muestras de especies de madera en función de la densidad y del tiempo de enfriamiento. (Tanaka, 2000)

De este ensayo se concluye que la temperatura superficial es función de la densidad de la madera. Este resultado coincide con los cálculos de Heisler. Existe una relación lineal entre la densidad y la temperatura superficial cuando el tiempo de enfriamiento es más de 20 minutos. Basado en este resultado, el nudo de conífera (la densidad es más alta que el material de madera de alrededor) y el deterioro en la superficie (la densidad es menor que la madera intacta) puede ser detectado por la termografía. Incluso si no hay diferencia de densidad pero la dirección de la fibra es distinta aparecen resultados por la diferencia en la difusividad de calor. Esto es importante para la detección de nudos.

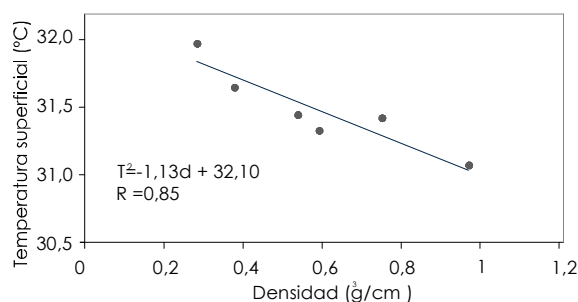
#### ▪ Detección de defectos usando el cambio de temperatura diurno

Dado que la aplicación de este ensayo a estructuras reales no resulta factible debido al tamaño y posición de las mismas, Tanaka utiliza el mismo principio pero basado en el cambio de temperatura diurno como fuente de excitación. Evalúa una gran columna de 70 cm de diámetro de "hinoki" consiguiendo una diferencia térmica de 1,3 °C entre el nudo y la madera de alrededor. El diámetro del nudo es de 5 cm.

Después de los resultados obtenidos usando el cambio de temperatura de las condiciones ambientales, Tanaka lleva a cabo un ensayo durante un día entero (desde las 5:24 a.m. a 18:57 p.m.), para encontrar la mejor hora para la inspección termográfica. Toma las seis muestras anteriores, otra deteriorada y otra con "sugi" todas de las mismas dimensiones (10x10x80 cm) y con nudos. Las sitúa al exterior en una zona bajo cubierta, abierta y a la sombra. Cada 10 minutos mide la temperatura del aire y la temperatura superficial de las muestras. Las condiciones ambientales es de un día de verano, 3 agosto: llueve por la mañana parando a las 4 a.m., está nublado por la mañana con intervalos soleados y por la tarde brilla el sol. La temperatura mínima es de 26,3 °C y la máxima 35,7°C.

En el ensayo se demuestra que las máximas diferencias de temperatura entre los nudos, las zonas deterioradas y las zonas sanas coinciden con los picos en la temperatura del aire.

Tanaka demuestra que, al igual que la temperatura de la superficie depende de la densidad (Figura IV.33.), existe una dependencia entre la temperatura de una superficie y la temperatura del aire.

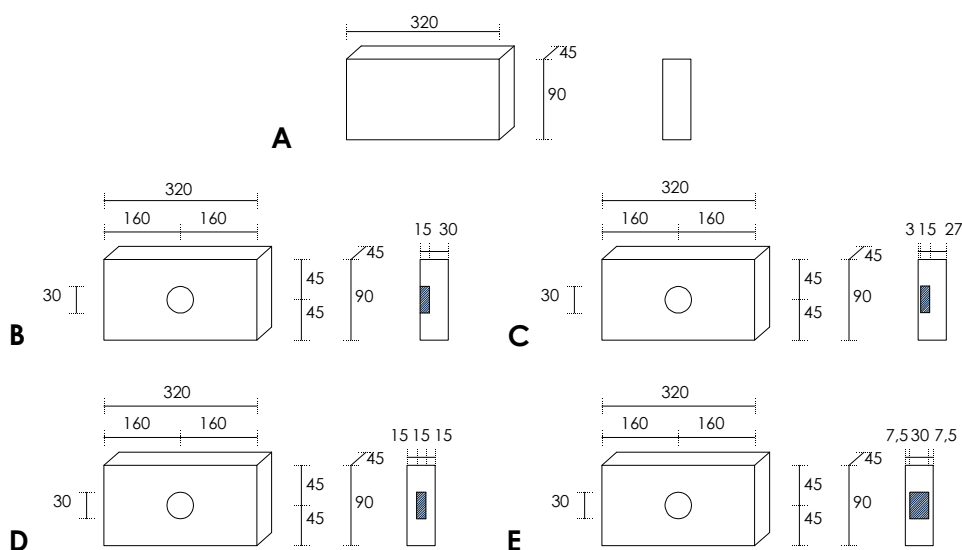


**Figura IV.33.** Temperatura superficial de seis especies distintas en función de la densidad. (Tanaka, 2000)

Con estos resultados Tanaka concluye que es posible la detección de defectos sobre la superficie de la madera con termografía usando simplemente el cambio de temperatura diurno. El estudio sobre los factores que distorsiona los resultados como el calentamiento directo por el sol o las dimensiones de la madera no se incluyen en este trabajo.

▪ DetECCIÓN DE DEFECTOS ARTIFICIALES DENTRO DE LA MUESTRA

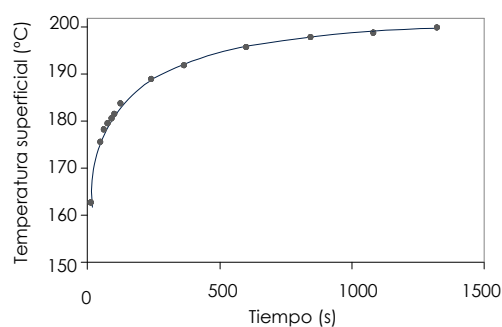
En una segunda fase, Tanaka trata de detectar cavidades en la madera simulando de esta forma un deterioro interno. Para ello toma cinco probetas de la especie "hinoki" con las dimensiones y tallas que se detallan en la Figura IV.34. La muestra A no tiene cavidad, la muestra B tiene una cavidad abierta. En las muestras C, E y D las cavidades son internas y la distancia a la superficie cambia: 3, 7,5 y 15 mm.



**Figura IV.34.** Dimensiones y geometría en milímetros de las cinco probetas utilizadas en el ensayo. (Tanaka, 2000)

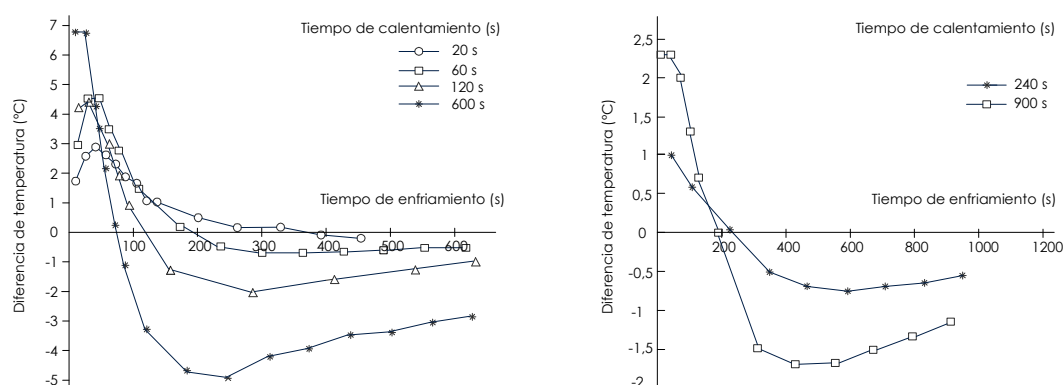
Para el ensayo Tanaka emplea una fuente de calor potente (1500 W), situada a 45 cm de las probetas, y una cámara. La distancia entre las probetas y la fuente condiciona la sensibilidad de la técnica frente a un defecto para el mismo tiempo. La sensibilidad de la técnica depende del espesor y de la conductividad del calor. Debido al alto espesor utilizado (45mm) y la baja conductividad de la madera, la detección de la cavidad resulta especialmente difícil.

El calentamiento de la superficie depende de la distancia, del tiempo de calentamiento y de la posición. La temperatura disminuye conforme nos alejamos del foco (Figura IV.35.).



**Figura IV.35.** Calentamiento de la superficie a lo largo del tiempo. (Tanaka, 2000)

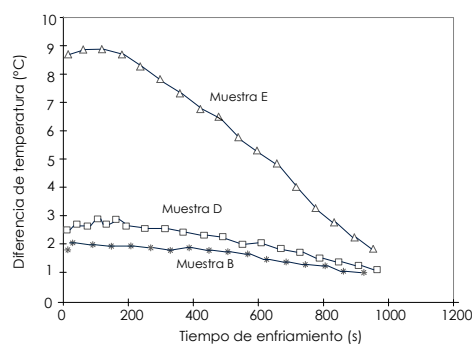
El calentamiento de la superficie es medido en las muestras C y E donde la cavidad se sitúa a 3 y 7,5 mm de la superficie. Se aplican diferentes tiempos de calentamiento (Figura IV.36.).



**Figura IV.36.** Diferencias de temperatura a lo largo del tiempo. La probeta se sitúa a 45cm de la lámpara. El periodo de calentamiento terminó a los 0s (a) Muestra C, b) Muestra B). (Tanaka, 2000)

Del ensayo concluye que para el primer caso, muestra C, aparece una clara diferencia entre la parte de la cavidad y la zona sana que se muestra tanto en la parte positiva y negativa de la curva. En el segundo caso, muestra E, apareció una gran diferencia en la parte negativa de la curva. En el caso de la muestra D no se detecta ninguna indicación en la imagen termográfica.

En el caso de la cara no calentada aparecen imágenes termográficas en todos los casos (B, D, E) excepto en la muestra A (Figura IV.37.). La diferencia de temperatura es calculada en el centro y a 9 cm.



**Figura IV.37.** Diferencias de temperatura en la muestras B, D y E a lo largo del tiempo. Estas temperaturas son tomadas en la cara no calentada. (Tanaka, 2000)



## Resultados:

De todos los ensayos realizados se concluye que la termografía puede ser utilizada como herramienta no destructiva. La teoría, ratificada por los ensayos de laboratorio, verifica el efecto de la densidad sobre la temperatura de la superficie y la conductividad en distintas orientaciones de la fibra.

Los ensayos realizados en el exterior para evaluar la aplicabilidad con el cambio de temperatura del aire a lo largo de las horas del día revelan diferencias de temperatura de 0,7 °C entre la madera sana y la deteriorada, así que puede ser un método útil para evaluar estructuras antiguas. Una diferencia de temperatura similar se alcanza entre las zonas de nudos y los alrededores.

Se realizan otros ensayos para simular la madera deteriorada en interior de la madera sana. La distancia entre la cavidad y la superficie era de 3, 7,5 y 15 mm. En los tres casos se detectan los defectos mediante la termografía empleando un calentador eléctrico para estimular la madera y alcanzar diferencias de temperatura entre 2 y 9 °C.

En el año 2001 **A. Wyckhuyse y X. Maldague** publican un estudio sobre la detección de defectos en la madera a través de la termografía. En una primera fase de la investigación estudian la aplicabilidad de la técnica para examinar el grado de pudrición de los postes de madera del tendido eléctrico y poder acometer su sustitución a tiempo para reducir costes.

Para detectar esta madera podrida Maldague genera un gradiente de temperatura en el poste empleando la termografía activa mediante distintas formas de estimulación: interna a través de un agujero que recorre todo el poste donde inserta una tubería con gases calientes circulando, externa y microondas. El hecho que sea un método no destructivo implica que no se debe dañar la madera con lo que la temperatura de calentamiento se limita a 200 °C. Por encima de este valor la madera arde ella misma. Para largas exposiciones no deben alcanzarse temperaturas superiores a los 80°C-100°C.

El principio básico de la investigación es que las propiedades térmicas de la madera sana y la madera deteriorada son distintas como resultado de una diferencia de humedad entre ambas. En la madera deteriorada la presencia de humedad es mayor debido a que su estructura interna es menos densa con lo que tiene una mejor retención de agua. Tales circunstancias sientan las bases para la hipótesis de partida de Maldague:

"En este estudio la madera deteriorada se localiza en las zonas con mayor contenido de humedad. De esta forma, la medida se reduce a la detección de una diferencia de humedad".

Otras propiedades que son necesarias conocer son la densidad, la conductividad térmica, el calor específico y el coeficiente de convección.

*Densidad:*

Maldague calcula la densidad introduciendo una nueva variable: G, la gravedad específica de la madera, definida como la proporción de la densidad de la madera sobre la densidad del agua a una temperatura de referencia dada. Cuando el contenido de humedad es conocido, el valor de G se expresa como:

$$G = \frac{G_b}{1 - 0,265 \cdot A \cdot G_b}$$

$G_b$  es la gravedad específica para la madera verde y A se define en función del contenido de humedad.

Si  $M < 30$ :

$$A = \frac{30 - M}{30}$$

Si  $M > 30$ ,  $G$  se convierte:

$$G = G_b$$

Finalmente la densidad:

$$\rho = 1,000 \cdot G \cdot \left(1 + \frac{M}{100}\right)$$

Si el contenido de humedad  $M$  no es conocido puede calcularse con la temperatura del aire y la humedad relativa.

*Conductividad térmica:*

La conductividad térmica, cantidad de calor que pasa a través de la unidad de superficie para un cuerpo de una unidad de espesor en una unidad de tiempo ( $W/m^{\circ}C$ ), es un parámetro pequeño para la madera debido a su estructura porosa y está afectada por numerosos parámetros como la densidad, el contenido de humedad, la dirección de la fibra, las irregularidades estructurales, los nudos y la temperatura. Para la madera,  $k$  incrementa con la densidad, el contenido de humedad y la temperatura. Hay una proporción de 2,5 entre la conductividad longitudinal y la transversal. Las siguientes relaciones se dan para una temperatura de  $30^{\circ}C$ .

Para  $M < 40\%$

$$k_T = G \cdot (0,2 + 0,0038 \cdot M) + 0,024$$

Para  $M > 40\%$

$$k_T = G \cdot (0,2 + 0,0052 \cdot M) + 0,024$$

Para otros rangos de temperatura:  $0^{\circ}C < T < 100^{\circ}C$

$$K = K_{30} \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 30)]$$

Finalmente, la conductividad térmica:

$$K_L = 2,5 \cdot K_T$$

*Calor específico:*

El calor específico corresponde a la cantidad de calor necesario para incrementar un grado de temperatura un material por unidad de masa ( $J/Kg^{\circ}C$ ). Al igual que la conductividad térmica existen ecuaciones empíricas para calcularlo en función de la temperatura y el contenido de humedad. Para una temperatura de  $T=30^{\circ}C$  para diferentes valores de  $M$ , el calor específico es dado por ( $m = M/100$ ):

Para la madera seca  $m < 0,05$ ,

$$C_p = \frac{1,260 + 4,185 \cdot m}{1 + m}$$

Para  $0,05 < m < 0,30$ ,

$$C_p = \frac{1,176 + 5,859 \cdot m}{1 + m}$$

Para  $m > 0,30$ ,

$$C_p = \frac{1,678 + 4,185 \cdot m}{1 + m}$$

Para otras temperaturas:  $0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$

$$C_p = C_{p30} \cdot [1 + 0,004 \cdot (t - 30)]$$

*Difusividad térmica:*

La difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) es obtenida de los parámetros anteriores:

$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho}$$

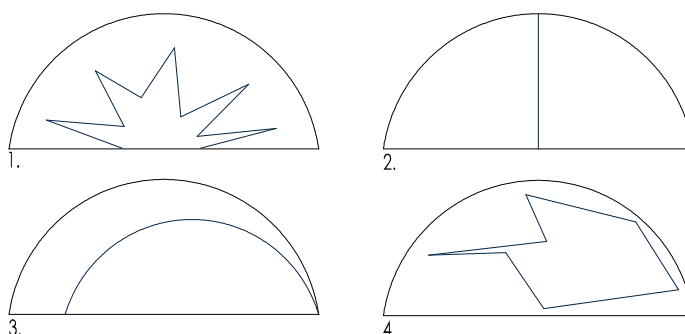
*Coeficiente convectivo:*

Para tener en cuenta las pérdidas térmicas sobre cada superficie, los efectos convectivos y de radiación deben ser incluidos en el modelo. Estos dos efectos pueden ser combinados en un coeficiente convectivo  $h = 11 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Una vez definidas las variables térmicas, la finalidad de la investigación es verificar si es posible desarrollar una técnica para la evaluación no destructiva de los postes eléctricos mediante termografía infrarroja. Para ello, Maldague impone unas condiciones de calor y geometría.

Para modelizar los postes de madera toma cilindros de madera con un diámetro de 20 cm. La madera sana es considerada con un contenido de humedad del 15% y la madera deteriorada 30% dado que este es el mejor caso para la difusividad térmica, sin agua libre.

Para simular los defectos toma diferentes formas. El defecto más común es en estrella. El cuarto de círculo es estudiado para definir diferentes temperaturas sobre la superficie. Los otros defectos se estudian para evaluar la influencia de la profundidad (Figura IV.38.). La especie de madera es la que se utiliza en Norteamérica para los postes eléctricos ( $G_b=0,45$ ).



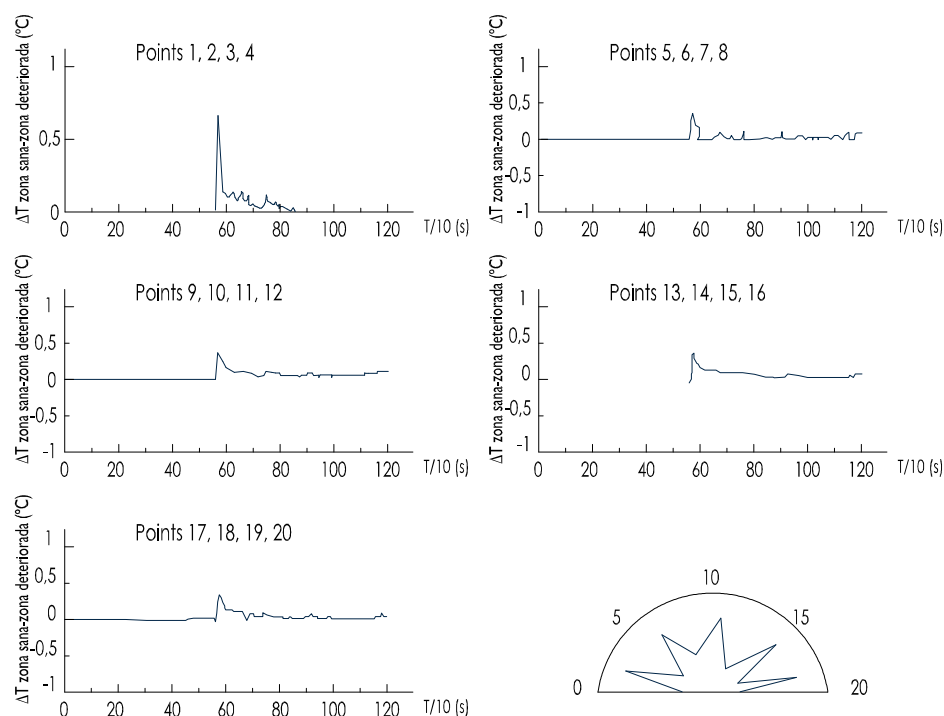
**Figura IV.38.** Forma de los defectos en las probetas (1, defecto en estrella; 2, defecto en cuarto de círculo; 3, defecto en círculo; 4, defecto irregular). (Maldague, 2001)

El primer método que utiliza Maldague para proceder al calentamiento es a través de un agujero longitudinal que recorre todo el poste ya que es la aplicación más real. La diferencia de temperatura se calcula haciendo la sustracción entre la evolución de la temperatura en la madera sana y la madera deteriorada. Para estas figuras, la influencia del defecto no alcanza la superficie. Además, la superficie interior alcanza una

temperatura de 200°C. Incluso los cálculos realizados en el cuarto de círculo demuestran que cuando la profundidad del defecto es mayor, la temperatura sube muy lentamente.

Dado que las diferencias de temperatura obtenidas con este método no son significativas Maldague estudia añadir una nueva fuente de calor exterior sumada a la fuente anterior mediante perforación interna (Figura IV.39.).

La aplicación de una fuente externa de calor tiene el inconveniente de que es difícil de aplicar en obra. Sin embargo, la potencia de calentamiento se reduce para obtener la misma temperatura. La diferencia entre este método y el anterior es la forma de medida. En el procedimiento anterior el frente de calor tiene que atravesar todo el espesor de la madera y el tiempo de viaje está relacionado con las propiedades térmicas.



**Figura IV.39.** Modelo teórico: calentamiento a través de un agujero interno y a través de la superficie, defecto con forma de estrella. Curvas de diferencia de temperatura. Potencia de calentamiento 2500 W durante 550 s. Medidas durante 1200 s. (Maldague, 2001)

#### Resultados:

Los resultados de estas experiencias prueban que la capacidad de detección de los defectos en la madera está estrechamente relacionada con la profundidad de dicho defecto. Para defectos localizados a más de 3 cm no se obtuvieron diferencias de temperatura significativas incluso después de más de media hora de observación. Dado que la madera podrida en los postes eléctricos se encuentra normalmente a mayor profundidad estos resultados no eran efectivos, así que, Maldague probó un nuevo método de calentamiento mediante microondas.

El calentamiento mediante microondas tiene la capacidad de calentar el material dependiendo de sus propiedades locales. Nuevamente la forma del defecto para llevar a cabo el ensayo es la forma de estrella, la más representativa de los casos reales. El modo del calentamiento del microondas se supone como una fuente interna simétrica.

El ensayo se realiza en una sección de un poste eléctrico real con una clara presencia de madera podrida en su interior. El centro del tronco se empapa con agua para comparar

las respuestas entre las zonas secas y húmedas. Como fuente de calentamiento se emplea un horno microondas doméstico.

Los termogramas obtenidos ponen de manifiesto que puede distinguirse la zona húmeda y la zona seca. Sin embargo, la detección de la madera podrida no resulta perceptible en estas imágenes.

Conclusiones:

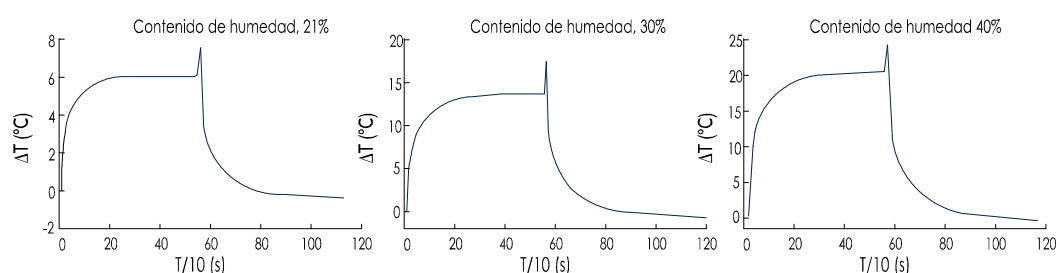
La conclusión más importante de este trabajo sería finalmente que la termografía no es un método adecuado para la inspección de postes de madera. Esto es así porque cada medición está condicionada por múltiples variables como son la profundidad de los defectos, las propiedades de la madera, que dependen a su vez de la especie, de la orientación de la fibra, de la temperatura y de la humedad; y de las condiciones del entorno de trabajo. Además, debido a la baja difusividad térmica de la madera solo es posible encontrar defectos cercanos a la superficie y los defectos más profundos no podrán ser hallados a menos que se haga bajo condiciones de laboratorio.

En una segunda fase del trabajo **Maldague** trata de establecer una sistemática para poder definir unos límites para la detección de defectos en madera mediante termografía. Los ensayos están basados en la estimulación térmica de la madera y su observación durante el proceso de enfriamiento. El acercamiento de este trabajo es generalizado para todos los tipos de madera y defectos y su objetivo es presentar la termografía como un método de ensayo no destructivo para la detección de daños en la madera.

Al igual que en el primer trabajo, Maldague parte de que la madera sana y la madera deteriorada tienen diferentes propiedades térmicas debido a la diferencia de humedad producida entre ambas debido a su nivel deterioro y al propio nivel de deterioro.

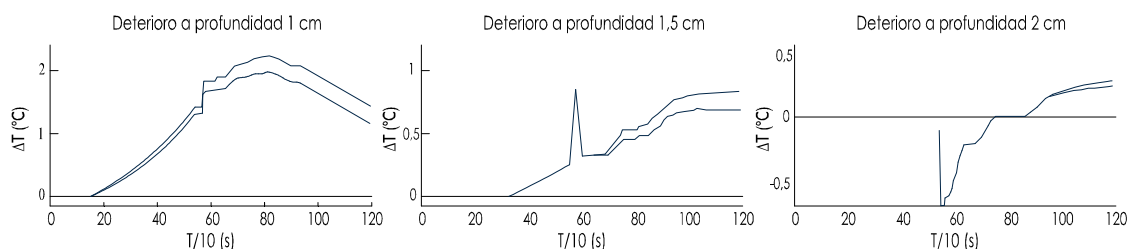
En un primer estudio determina la influencia del contenido de humedad en la señal a profundidades distintas en los modos transmisión y reflexión.

En el primer ensayo toma una probeta de madera podrida con distintos contenidos de humedad (21, 30 y 40 %). Las medidas se toman en reflexión (Figura IV.40.).



**Figura IV.40.** Madera putrefacta con diferentes contenidos de humedad. Potencia de calentamiento 2500W durante 550s. (Maldague, 2001)

En un segundo ensayo, toma madera con defectos situados por debajo de la superficie a distintas profundidades (Figura IV.41.).



**Figura IV.41.** Madera con defectos por debajo de la superficie a diferentes profundidades. Potencia de calentamiento 2500W durante 550 s. (Maldague, 2001)

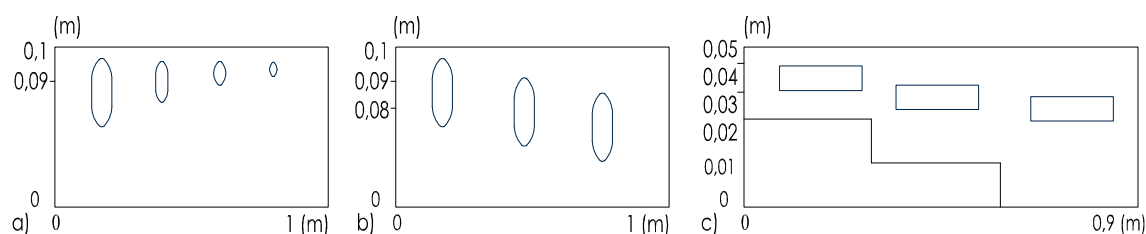
## Resultados:

Los resultados muestran que las diferencias de temperatura por encima de los 20 °C se alcanzan para contenidos de humedad por encima del 40%. Por otro lado, la temperatura decrece rápidamente y más aún con la profundidad. Por debajo de 2 cm la señal decrece tanto que la diferencia de temperatura prácticamente no se puede medir.

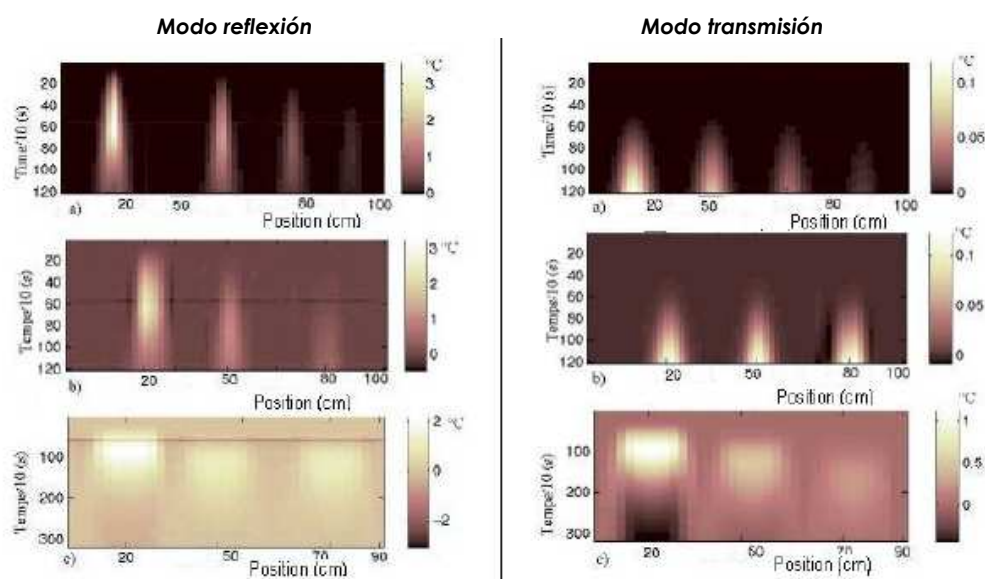
- Detección de defectos:

## Estudio teórico:

Tras este primer estudio hace una simulación para establecer un posible rango de profundidades detectables. Para ello toma 3 probetas cúbicas donde talla huecos con distinto tamaño y profundidad. En la primera de las probetas toma una forma circular y pequeño tamaño (0,5, 1, 1,5 y 2 cm a 0,5 cm de profundidad). En la segunda hace taladros del mismo diámetro (2 cm) pero a diferentes profundidades (0,5, 1 y 1,5 cm). En la tercera muestra hace taladros más significativos (10 cm de longitud con 1 cm de ancho y profundidades de 1, 1,5 y 2 cm) ya que para que una pieza de madera pierda resistencia el defecto debe tener mayor entidad siendo también muy importante su localización (Figura IV.42.).



**Figura IV.42.** Geometría usada para el estudio teórico de los modos de reflexión y transmisión. (Maldague, 2001)



**Figura IV.43.** Modelo teórico usando las geometrías de la Figura IV.36. (Maldague, 2001)

Los resultados muestran que para la reflexión, profundidades mayores a 2 cm la señal es demasiado baja y con frecuencia lleva mucho tiempo para tomarla. Para defectos grandes la señal es baja y a grandes profundidades casi no se puede observar. Para el modo de transmisión no es posible establecer defectos a distintas profundidades porque la señal llega al mismo tiempo a la superficie (Figura. IV.43.).

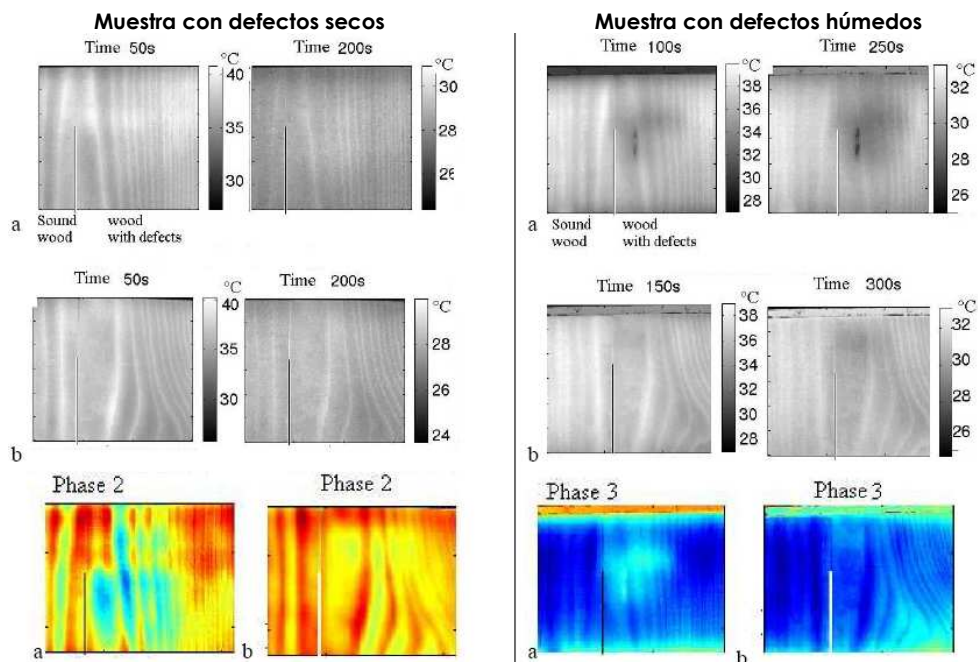
Ensayos:

### 1. Medidas en reflexión

Para confirmar estos resultados realiza experimentos con muestras que tenían formas similares a las usadas en la simulación. Debido a la dificultad de poder obtener un calentamiento homogéneo en toda la pieza reduce las dimensiones de las piezas y el último caso expuesto en la simulación no se lleva a cabo tanto por las dimensiones de la probeta como de los defectos. Para reproducir los defectos internos se cortan las piezas por la mitad, en una de ellas se reproducen los huecos como se muestra en la Figura IV.36 y la otra se mantiene intacta.

Durante el ensayo ambas mitades se unen para formar una única pieza con una parte sana y una parte defectuosa. Esto resulta útil para comparar la respuesta de la zona sana y la zona dañada. Después de un periodo de calentamiento las imágenes se graban y se tratan con el programa informático Matlab. La cámara usada tiene un FPA (Focal Plane Array) de 2-5  $\mu\text{m}$ . La muestra se calienta durante 30 segundos con una potencia de 7200 w.

Inicialmente estudia las muestras con defectos secos. Hace huecos con un material de la misma cantidad de humedad que la madera (15%). Estos defectos casi no se detectan. Sin embargo, la estructura de la superficie de la madera se distingue claramente permitiendo el control de la superficie. También estudia la detección de defectos húmedos (30% aproximadamente) bajo la superficie (Figura IV.44.).



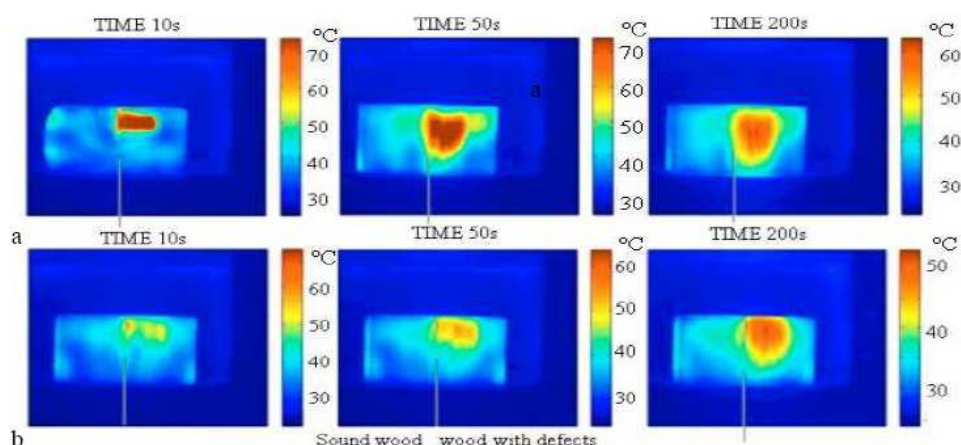
**Figura IV.44.** Ensayos en reflexión con muestras con defectos secos y húmedos. La geometría se ha extraído de la Figura IV.42 para el caso a y b. El caso c no se estudia por las dimensiones de la muestra y el defecto y su dificultad para un calentamiento homogéneo. (Maldague, 2001)

En este ensayo, como se había indicado teóricamente, se demuestra que los defectos más profundos tardan más en aparecer y solo los defectos cercanos a la superficie se detectan. Los otros podrían detectarse aplicando grandes cantidades de calor que podrían dañar la madera. La teoría indica que para detectar defectos grandes la diferencia de temperatura debe ser mayor de 3°C. Para defectos pequeños y cercanos a la superficie la diferencia se reduce a 1°C.

Por último, se lleva a cabo un ensayo usando un microondas doméstico para estimular la madera. La muestra se calienta durante 2 minutos a una potencia de 1250 W. Con los



defectos secos las diferencias térmicas no resultan significativas. Para los defectos húmedos los resultados son más interesantes para los defectos más grandes y cercanos a la superficie. Para los defectos más lejanos y para los pequeños los resultados son más borrosos y resulta más difícil su identificación. Estos experimentos se realizan en reflexión (Figura IV.45.).

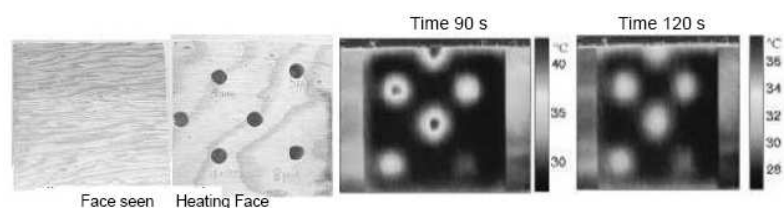


**Figura IV.45.** Ensayos en reflexión tras el calentamiento durante 2 minutos en un microondas doméstico. Geometría de la Figura IV.36. (Maldague, 2001)

## 2. Medidas en transmisión

La teoría desarrollada indica que la diferencia de temperatura debe ser  $0,1^{\circ}\text{C}$  para las geometrías anteriores, una señal apenas visible en la práctica. De hecho, los ensayos anteriores para transmisión no revelan nada significativo.

Por esta razón, se hacen otro tipo de muestras con defectos menos profundos. La muestra se calienta en la cara que tiene los agujeros y las medidas se toman en la otra cara. Los resultados muestran que es posible detectar todos los orificios (Figura IV.46.).



**Figura IV.46.** Ensayos en transmisión sobre muestras con perforaciones. (Maldague, 2001)

Este estudio demuestra que la termografía puede ser utilizada para la inspección de madera pero con precauciones debido al gran número de variables que intervienen, tales como el contenido de humedad de la misma y su baja conductividad térmica.

La hipótesis de partida del trabajo fue suponer que la madera sana y la madera podrida tienen un diferente contenido de humedad. La teoría confirma que los defectos secos no pueden ser detectados con termografía. Este hecho limita el uso de la termografía para la investigación con madera podrida que tenga un distinto contenido de humedad. Para los defectos localizados bajo la superficie su detección fue posible aunque muy complicada.

En definitiva, la termografía resulta una herramienta útil para pequeños defectos y pequeñas profundidades. Defectos más grandes y profundos pudieron detectarse pero después de un largo periodo de espera.



En 2007, **A. Kandemir-Yucel, A. Tavukcuoglu y E.N. Caner-Saltik** presentan un trabajo sobre la aplicación in situ de la técnica para la detección de daños en las estructuras de madera de un edificio histórico usando la termografía y la velocidad de ultrasonidos. El trabajo se realiza en una mezquita de Ankara del siglo XIV. La interpretación combinada de los resultados permitió evaluar de una forma más completa el estado de conservación de los elementos de madera teniendo en cuenta los problemas de humedad y las "malas reparaciones" realizadas en el pasado con materiales incompatibles.

Para el estudio extraen y ensayan probetas de los elementos de madera de la mezquita. El edificio contaba con una cubierta de madera apoyada sobre una estructura vertical de 24 pilares de madera y unos muros exteriores de ladrillo.

Se toman imágenes de infrarrojos en el interior y en el exterior del edificio dos veces al día, una vez por la mañana y una vez por la noche en invierno. La cámara se configura con los parámetros de temperatura ambiente, humedad relativa, distancia a la zona a fotografiar y emisividad de las superficies. Las superficies eran muros de ladrillo, pilares de madera pintados, techos no pintados y paredes con yeso.

Las medidas de ultrasonidos se realizan en los pilares de madera. Cada columna se examina en cuatro puntos, este, oeste, norte y sur, en intervalos de 30 cm de altura.

En ambos ensayos se miden las condiciones ambientales.

Análisis de laboratorio:

En el laboratorio se analizan 15 probetas de madera antigua y madera nueva de diferentes especies: pino, tilo, álamo, nuez, olivo y sauce para unas condiciones de humedad relativa de 56, 75 y 90% durante los periodos de absorción y desorción. El aumento o la pérdida de humedad se halla mediante el incremento y la pérdida de peso. Mediante el higrómetro se miden las humedades superficiales. Las medidas de ultrasonidos se realizan en las direcciones paralela y perpendicular a las fibras.

Resultados:

El intervalo de humedad de las muestras de madera oscila en el rango de 8,9%-18,6% para las condiciones de humedad relativa de 56, 75 y 90%. El contenido de humedad de la madera aumenta a la vez que aumenta la humedad relativa, las muestras absorben humedad. Cuando llegan a una humedad del 90% y se baja la humedad relativa comienza un periodo de desorción aunque no se llegan a los valores de humedad iniciales.

Para la velocidad de ultrasonidos se determina que conforme aumenta la humedad relativa disminuye la velocidad de ultrasonidos siendo menor las velocidades en la dirección perpendicular a la fibra que en el sentido longitudinal.

Los valores tomados en los pilares oscilaban entre 706-1753 m/s en la dirección perpendicular. La media de los valores de ultrasonidos en laboratorio es de 1040 m/s con lo que determinan que los pilares estaban sanos. En la distribución de temperaturas en las imágenes de infrarrojos hallan intervalos de temperatura de 2 °C a lo largo de cada pilar.

Por otro lado, se analizan muestras de pino viejo y nuevo. Se obtiene que la madera antigua contiene menos humedad interior que superficial mientras que para la madera nueva se obtienen resultados inversos, esta madera tiene más humedad interior que en su superficie.

Los resultados de las imágenes de termografía muestran diferencias térmicas de 5,5 °C en la fachada y la cubierta debido a la existencia de materiales húmedos. Además de la humedad, se concluye que las imágenes de infrarrojos están afectadas por los cambios en las propiedades térmicas debido al tipo de madera, la antigüedad, el estado de conservación y las condiciones climáticas.

En invierno los pilares fueron calentados y en las imágenes infrarrojas se detectaron diferencias de temperatura de 39 °C. En las zonas más calientes se detectaron las grietas.

Conclusiones:

La conclusión más importante de este trabajo es que la unión de los ultrasonidos y la termografía constituyen una buena herramienta para evaluar las condiciones de una estructura de madera. La termografía permite detectar los problemas de humedad y su distribución. Por otro lado, los ultrasonidos permiten detectar los distintos grados de humedad de las piezas. Diferencias de temperatura de 1-2 °C no significan daños en la estructura. Mayores diferencias representan problemas de humedad.

### **IV.1.3.5. La termografía como técnica para la detección de termitas**

Uno de los objetivos del presente trabajo es poder determinar la pérdida de densidad en las estructuras de madera producida, en algunos casos, por un ataque de termitas. Se pretende poder estimar estas pérdidas y el nivel de deterioro tanto si la actividad de estos insectos ha cesado o si continúa activa. Siguiendo esta línea se han realizado estudios que permiten detectar mediante termografía los focos activos de estos insectos aprovechando la humedad y la temperatura de las secreciones salivares con las que rellenan sus galerías.

En este sentido, desde 1999 el "National Center for Preservation Technology and Training" (NCPTT) en conjunción con "Real-Time Thermal Imaging Inc" y la ciudad de Nueva Orleans han estudiado el uso de la termografía para detectar la actividad de termitas subterráneas en los edificios históricos.

Así, **Gilberg M. et al.** publican un trabajo realizado sobre la Iglesia de St. Alphonsus en Nueva Orleans. Esta iglesia fue construida en 1855 y es un ejemplo de arquitectura italiana del siglo XIX. Fue declarado monumento histórico en 1996.

A finales de 1970 esta iglesia se cerró debido a un incremento de los costos de mantenimiento y no se reabrió hasta 1990. Como consecuencia de la falta de mantenimiento de estos años, la iglesia sufrió importantes daños producidos por humedades y por la actividad extensiva de termitas subterráneas a lo largo de toda la estructura.

En Estados Unidos las termitas son una plaga importante. La mayor parte de su actividad se atribuye a la especie *formosanus* cuyas colonias pueden contener varios millones de termitas que, mediante galerías, pueden recorrer grandes distancias. La presencia de estas galerías es lo que alerta sobre la presencia de su actividad.

Gilberg M. et al. buscan en la termografía poder detectar estas colonias de termitas en las estructuras de madera basándose en que la colonia genera calor como consecuencia de su actividad metabólica y humedad. Las termitas transportan considerables cantidades de humedad cuando construyen sus nidos y sus colonias de barro. Esta humedad contribuye a crear diferencias de temperatura.

La cámara utilizada empleada en estos ensayos tiene un espectro de respuesta de 7 a 12 micras. El detector es de una serie no refrigerada cuyo conjunto FPA (Focal Plane Array) es capaz de detectar diferencias de temperatura de hasta 0,05 °C. Se usaron dos lentes, de 50 y 25 mm.

La termografía se realiza entre las 8 y las 10 de la mañana para aprovechar la diferencia térmica entre el interior y el exterior del edificio. La termografía interior revela problemas de humedad en los techos de yeso lo cual se confirma examinando la estructura del ático. La cubierta estaba visiblemente dañada lo que había dado lugar a problemas de filtraciones.

En cuanto a la actividad de las termitas se detectan, mediante un análisis visual colonias de *formosanus*, tanto antiguas como más recientes, en los pares de la estructura de la

cubierta. La termografía permitió delinear el antiguo daño de termitas dentro de vigas, así como nuevas áreas sospechosas de actividad. La perforación de estas áreas confirmó su actividad.

Conclusiones:

De este estudio se concluye que las imágenes térmicas pueden detectar viejos daños de termitas porque la conductividad térmica de la madera deteriorada o dañada no es la misma que la de la madera sana. En el caso de las áreas de actividad de termitas activas pueden ser localizadas debido al mayor contenido de humedad que generan y a que pueden generar más calor debido a su actividad metabólica. La intensidad del píxel varía de invierno a verano. En invierno, las áreas de actividad de las termitas aparecen más cálidas y en veranos más frías que el resto de la madera.

Por otro lado, como ya se ha comentado en otros casos la termografía vuelve a confirmar que es una herramienta muy útil para detectar humedades de áreas que, en muchos casos, pueden resultar de imposible acceso.

En 2002, **K. James y D. Rice** como directores de una empresa australiana dedicada a combatir plagas de termitas publican un artículo donde describen la magnitud del problema de las termitas en países como EEUU y detallan las ventajas de la termografía como técnica pionera para su detección.

James y Rice describen que los métodos usados hasta ese momento para la detección de las termitas consistían en técnicas tradicionales en las que se abrían catas con punzones en aquellas zonas en las que se intuía que podía haber un núcleo de infección. Algunas tecnologías más actuales ayudan a la detección, usando los medidores de humedad, sonido o incluso por microondas. No obstante, ninguno de éstos ofrece las ventajas de las imágenes térmicas.

James y Rice detallan la aplicación de esta técnica en el edificio del parlamento en Brisbane, Australia. La toma de imágenes comienza en 1999 y en 2001 se detecta un foco en un balcón y en el marco de una puerta. Como consecuencia se decide levantar estos elementos confirmando la presencia de estos insectos.

Este estudio concluye que la termografía constituye una técnica factible para la detección de termitas caracterizada por ser no destructiva, rápida y efectiva, y que permite escanear grandes áreas, tanto interiores como exteriores. Por otro lado es una técnica no contaminante ya que no usa radiación o productos químicos y aunque no detecta termitas individualmente permite localizar la infestación con precisión para poner los productos químicos en la zona con mejor efecto.

### Notas del capítulo:

#### Libros

Bucur, V. "Nondestructive characterization and Imaging of Wood". SPRINGER (2003). 354 págs. ISBN: 35404381408.

#### Capítulos de libros

Masuda M, Fujimoto K, Takino S, Sadoh T (1995). "Change of thermal images of timber including knots under repeated bending". Bull Kyoto University. For 67:167-173.

Masuda M, Takahashi S (1998). Change of thermal images of lumber including knots, finger joints and metal connectors. Bull Kyoto University. For 69:114-128.

#### Artículos

Abedi J., Banerjee, S. "Infrared Thermographic Mapping of Wood Surface Moisture During Drying". Institute of Paper Science and Technology, Atlanta (1999).

Busse, G. "Imaging with optically generated thermal waves". *Physical Acoustics*. Vol. XXII. Academic Press, New York (1988). pp. 403-478.

Busse, G. "Nondestructive evaluation of polymer materials". *NDT Evaluation Int.* Vol. 27. Nº 5. (1994). pp. 253-262.

Gilberg, M., Riegel, C., Melia, B., Leonard, J. "Detecting subterranean termite activity with infrared thermography: A Case Study". *APT Bulletin*. Vol. 34, Nº 2/3. (2003). pp. 47-53.

Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A., Caner-Saltik, E.N. (2007). "In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity". *Infrared Physics & Technology*. Vol. 49. (2007). pp 243-248.

Ludwig, N., Redaelli, V., Rosina, E., Augelli, F. "Moisture detection in wood and plaster by IR thermography". *Infrared Physics & Technology*. Vol 46. (2004). pp 161-166.

Luong, MP. "Mechanical performance of wooden construction materials". Ecole Polytechnique. France (1996).

Mattone, M. "Use of Non-Destructive tests in the evaluation of the state of repair of consolidation interventions on wooden structures". Politecnico di Torino, Department of Architecture. Italy (2000).

Niemz P. "Methods of non-destructive wood testing". *Wood Physics*. (2006).

Wyckhuysse, A., Maldague, X. "A study of Wood Inspection by Infrared Thermography. Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography". *Research in Nondestructive Evaluation*. (2001). pp. 1-12.

Wyckhuysse, A., Maldague, X. "Wood Inspection by Infrared Thermography, Part II". *Research in Non destructive Evaluation*. (2001). pp. 13-21.

#### Congresos

James, K., Rice, D. "Finding termites with thermal imaging". *Inframation, the thermographer's conference*. 2002.

Meinlschmidt, P. "Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials". *14th International Symposium on non-destructive testing of wood*. Hannover (Germany), 2005.

Tanaka, T. "Wood inspection by thermography". *Wood NTD-2000 – 12th International Symposium on non-destructive testing of wood*. Vol 6. Nº 03. 2000.

#### IV.1.4. EL RESISTÓGRAFO: LA INSPECCIÓN CUASI NO DESTRUCTIVA DE LOS FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO

El resistógrafo es un equipo de ensayo que permite evaluar de manera cuasi no destructiva el estado de conservación de elementos estructurales de madera. Para ello ejecuta una perforación en la madera a velocidad constante, con una aguja de 3 mm de diámetro, registrando la resistencia que ofrece la madera a la perforación mediante la grabación de la potencia consumida durante ese proceso. Esta potencia es interpretada en términos de variación de densidad en esa sección, suponiendo que a mayor densidad mayor será la resistencia al paso de la aguja. El equipo del resistógrafo es portátil por lo que puede ser utilizado para evaluar estructuras en servicio.

El principio del resistógrafo es inventado en 1985 por dos ingenieros alemanes para evaluar el estado de conservación de postes. Años más tarde, se sientan los fundamentos físicos de la técnica en una tesis doctoral realizada por **Rinn**. De este modo, se lanza el primer prototipo al mercado con el nombre de DENSITOMAT. El uso principal era la evaluación de árboles y las cubiertas de iglesias y castillos en Alemania. Años más tarde se realizaron varias mejoras en el equipo modificando la reproducción de datos, la velocidad y su resolución. Las nuevas características del equipo permitían identificar los anillos de crecimiento. Este nuevo modelo fue patentado y recibió un premio de investigación. En 1992, se desarrolló la cuarta generación de herramientas de perforación, llamada RESISTOGRAPH (resistógrafo) en el que se mejoran las características del DENSITOMAT.

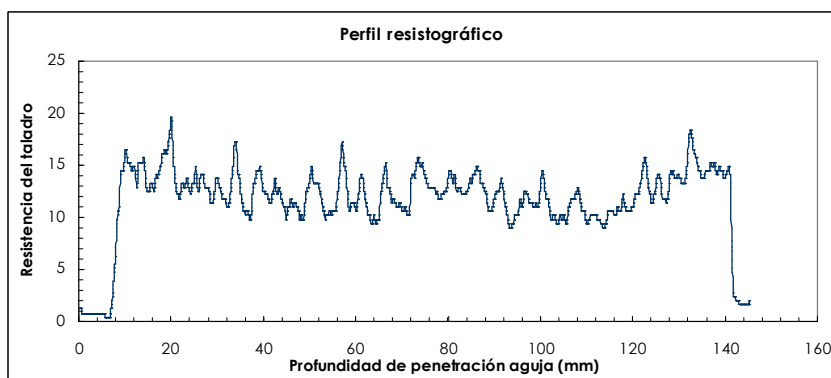
El RESISTOGRAPH contiene dos motores, uno responsable de la rotación de la aguja y el otro de su avance. El diámetro de su punta es 3 mm, dos veces el diámetro del eje 1,5 mm. De esta forma la resistencia al taladro afecta principalmente a la punta y no incrementa con la profundidad de penetración debido al efecto de fricción del eje. La resistencia mecánica a la penetración es medida mediante la grabación de la potencia consumida por el equipo.

La versión estándar del RESISTOGRAPH alcanza una profundidad de penetración de 41 cm, el más pequeño de 28 cm y el más largo de 100 cm. La información recogida en estas perforaciones es almacenada en la memoria del equipo a la vez que puede ser impresa al mismo tiempo que se realiza el taladro. La velocidad de avance de la aguja es de 28 mm/min y la batería que lleva incorporada permite realizar 150 perforaciones.

##### *Perfiles resistográficos:*

Una medición realizada con resistógrafo tiene un carácter eminentemente local siendo necesarias varias mediciones en una misma pieza para poder establecer un diagnóstico.

Los perfiles resistográficos en una madera sana muestran el ancho de los anillos de crecimiento distinguiendo entre la madera de verano y la madera de primavera debido a las variaciones de densidad entre ambas (Figura IV.47).



**Figura IV.47.** Perfil resistográfico de una madera sana. Diferencia entre la madera de verano y la madera de primavera. (Elaboración propia)

Cuando la madera presenta un deterioro, el perfil resistográfico baja considerablemente. Si el deterioro es provocado por un ataque de hongos la resistencia a la penetración del taladro disminuye considerablemente hasta mantenerse a un nivel constante. Sin embargo cuando la madera presenta un ataque por insectos la resistencia disminuye puntualmente a medida que el resistógrafo atraviesa las galerías producidas por ellos.

El objetivo original del desarrollo del resistógrafo fue analizar el estado de conservación de los postes de madera y árboles.

Desde entonces, han aparecido varios trabajos, realizados por autores sobre todo alemanes, portugueses e italianos, en los que se describe la técnica, se aplica a diferentes especies de madera para estimar su densidad y se estudia su posible aplicación para la evaluación de estructuras de madera en edificios.

#### **IV.1.4.1. Aplicación del resistógrafo para la estimación de la densidad de la madera**

En 2001, **Ceraldi**, desde el Departamento de Construcción y Métodos Matemáticos en Nápoles, publica un artículo en el que emplea el resistógrafo para la evaluación de las características mecánicas de la madera.

Este trabajo es planteado después de evaluar que el resistógrafo es sensible a las variaciones de densidad de la madera. De este modo, dada la relación que existe entre la densidad de la madera y su resistencia a compresión, se propone correlacionar la resistencia a compresión con las medidas de resistógrafo.

Para los ensayos utiliza dos sándwiches realizados con diferentes especies de madera. Uno de ellos está formado por 4 capas de madera de castaño, álamo, haya y arce. El segundo está compuesto por 3 capas de madera de abeto y pino. De cada uno de estos sándwiches se realizan 5 medidas de resistógrafo.

De cada una de las capas de los dos sándwiches se extraen 16 probetas de 25x25x50 mm que se ensayan a compresión y se determina su densidad.

Los resultados revelan una buena correlación entre las medidas de resistógrafo y la densidad de la madera:

$$d = 388,49 + 220,9 \text{ RM} \quad R^2 = 0,66$$

siendo;

d Densidad de la madera en Kg/m<sup>3</sup>

RM Medida de resistógrafo en Bits en un rango de medición de 0 a 2.

Por el contrario, obtiene que no existe correlación entre las medidas de resistógrafo y la resistencia a compresión ( $R^2 = 0,04$ ). Esta baja correlación es, posiblemente, debida a la mezcla de diferentes especies de madera.

Tras estos ensayos iniciales donde mezcla varias especies, Ceraldi et al. plantean una campaña de ensayos sobre una viga de haya. Esta viga es extraída de una obra de rehabilitación y contiene zonas deterioradas.

Los ensayos planteados persiguen la misma finalidad que los ensayos previos. Sobre esta viga trazan varias secciones sobre las que realizan 4 medidas de resistógrafo con diferentes orientaciones. Posteriormente, extraen pequeñas probetas en las que determinan su densidad y resistencia a compresión. En este caso, la correlación entre la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo origina un coeficiente  $R^2$  de 0,59, el mismo coeficiente obtenido al correlacionar la densidad con la resistencia a compresión.

Los resultados obtenidos revelan la validez de la metodología propuesta por Ceraldi a través de la cual es posible estimar la resistencia a compresión de las secciones transversales de una viga de madera.

En el año 2002, **Gantz**, desde la Universidad de Carolina del Norte, presenta una tesis doctoral en la que emplea las medidas de resistógrafo para predecir la densidad de la madera de árboles en pie de varias especies (*Pinus Radiata* y *Caribaea*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus urophylla*). Dentro de cada especie estudia muestras de diversa procedencia.

Los ensayos de resistógrafo se realizan sobre cada árbol a una altura aproximada de 1,3 m del suelo. Posteriormente, se extraen probetas de 12 mm en las proximidades de la sección de ensayo y se obtiene su densidad mediante métodos densimétricos gammas.

Los resultados revelan que las correlaciones entre las medidas de resistógrafo y la densidad de la madera presentan diferentes coeficientes de ajuste de unas especies a otras. Asimismo dentro de cada especie el coeficiente de regresión varía de una muestra a otra.

<i>Pinus Caribaea</i>	Muestra 1 (RM-d)	$R^2= 0,59$
	Muestra 2 (RM-d)	$R^2= 0,59$
	Muestra 3 (RM-d)	$R^2= 0,60$
<i>Pinus Radiata</i>	Muestra 1 (RM-d)	$R^2= 0,25$
	Muestra 2 (RM-d)	$R^2= 0,17$
	Muestra 3 (RM-d)	$R^2= 0,34$
<i>Eucalytus globulus</i>	Muestra 1 (RM-d)	$R^2= 0,35$
	Muestra 2 (RM-d)	$R^2= 0,21$
	Muestra 3 (RM-d)	$R^2= 0,20$
<i>Eucalytus urophylla</i>	Muestra 1 (RM-d)	$R^2= 0,57$
	Muestra 2 (RM-d)	$R^2= 0,38$
	Muestra 3 (RM-d)	$R^2= 0,25$

Las relaciones obtenidas entre las medidas de resistógrafo y la densidad muestran un grado de correlación de moderado a bajo con unos coeficientes de regresión que varían entre 0,17 y 0,60. Estos resultados plantean la dificultad de establecer una ecuación lineal para la estimación de la densidad en función de los resultados resistográficos. Para mejorar estos resultados, serían necesarios estudios que tuviesen en cuenta factores como el contenido de humedad.

En esa misma línea de trabajo, en el año 2004, **Fikret Isik y Bailian Li** publican un estudio basado en la medición de la densidad de árboles en pie mediante resistógrafo para su empleo en programas de mejora genética. Los ensayos se realizan sobre madera de la especie *Pinus Taeda* L. procedente de 4 localizaciones distintas.

Los ensayos de resistógrafo se realizan a una altura aproximada de 1,3 m del suelo con una velocidad de penetración de la aguja de 30 cm/min. Tras los ensayos de resistógrafo se extraen probetas de 12 mm de diámetro y 30 mm de largo en un área próxima a la sección donde se realiza el perfil resistográfico. A partir de estas probetas se determina la densidad de la sección sobre la que se realiza el perfil resistográfico mediante la relación entre la masa y el volumen de la probeta seca.

Los resultados muestran una relación lineal entre la medida de resistógrafo y la densidad de la madera con unos coeficientes de ajuste que varían de 0,21 a 0,44 según la procedencia de las muestras. Estos valores son obtenidos como la media obtenida de cada árbol individualmente.



Muestra 1	$d=267,7568+8,154722 \text{ RM}$	$R^2= 0,44$
Muestra 2	$d=282,5823+6,517111 \text{ RM}$	$R^2= 0,31$
Muestra 3	$d=288,9329+9,348172 \text{ RM}$	$R^2= 0,21$
Muestra 4	$d=308,0527+4,476494 \text{ RM}$	$R^2= 0,24$

Al combinar las correlaciones entre la densidad y la amplitud de las 4 localizaciones el coeficiente de correlación  $R^2$ , baja hasta un valor de 0,01.

Al dividir la correlación fenotípica resultante de la combinación de las 4 localizaciones según factores genéticos y ambientales se obtiene que, teniendo en cuenta únicamente aspectos genéticos, el coeficiente de correlación  $R^2$  mejora alcanzando un valor de 0,90. Este hecho demuestra que los factores ambientales tienen un efecto negativo sobre las correlaciones fenotípicas iniciales.

Finalmente, aunque se menciona en el trabajo, Fikret Isik y Bailian Li no establecen ninguna corrección sobre el contenido de humedad de los árboles vivos, parámetro que afecta sensiblemente a los resultados resistográficos.

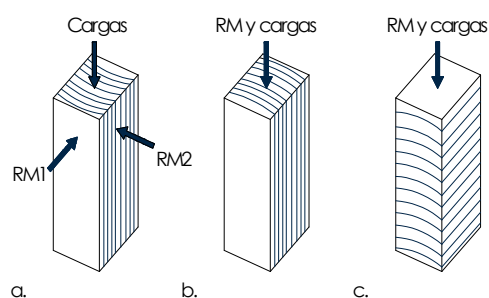
También en el año 2004, **Tseng y Hsu** presentan un estudio en el que tratan de establecer una correlación lineal entre la resistencia a compresión de la madera, su densidad y los valores de resistencia a la penetración aportados por el resistógrafo. El objetivo principal de este estudio es proporcionar una ecuación para estimar la resistencia a compresión, así como ser más eficiente en las evaluaciones in situ de estructuras de madera.

Para realizar este estudio emplean madera de abeto chino (*Cunninghamia lanceolata*), usada tradicionalmente en las construcciones de Taiwan. Los ensayos se realizan sobre un total de 151 probetas distribuidas en 3 lotes según la dirección de aplicación de la carga y la dirección del ensayo resistográfico (Figura IV.48.). Todas las probetas tienen un contenido de humedad controlado del 12%.

Probetas Tipo A (53 probetas): Dirección de carga paralela a la fibra. Mediciones resistográficas en las direcciones radial y tangencial a la dirección de la fibra.

Probetas Tipo B (53 probetas): Dirección de carga paralela a la fibra. Mediciones resistográficas en la dirección paralela en la dirección de la fibra.

Probetas Tipo C (45 probetas): Dirección de carga perpendicular a la fibra. Mediciones resistográficas en la dirección radial a la dirección de la fibra.



**Figura IV.48.** Tipología de las probetas de ensayo (a. Probetas Tipo A, b. Probetas Tipo B, c. Probetas Tipo C).

En todos los casos las mediciones resistográficas se realizan a una velocidad de 1000 rpm aplicando a su vez una carga sobre las probetas de 5 KN .

Los resultados obtenidos demuestran que el valor medio de la resistencia a la penetración en las muestras Tipo A fue mayor en la dirección A1 que en la dirección A2. Asimismo, entre



las muestras Tipo B y C los resultados aportan unos valores medios superiores de resistencia a la penetración para las muestras Tipo B.

Las regresiones obtenidas en cada tipología de probeta ensayada entre las medidas de resistógrafo, RM, y la resistencia a compresión,  $\sigma_c$ , o la densidad,  $d$ , respectivamente, aportan los siguientes coeficientes de ajuste ( $R^2$ ):

Probetas Tipo A	RM (radial) - $\sigma_c$ : 0,081 RM (tangencial) - $\sigma_c$ : 0,112	RM (radial) - $d$ : 0,402 RM (tangencial) - $d$ : 0,192
Probetas Tipo B	RM (paralelo) - $\sigma_c$ : 0,327	RM (paralelo) - $d$ : 0,334
Probetas Tipo C	RM (perpendicular) - $\sigma_c$ : 0,716	RM (perpendicular) - $d$ : 0,666

En base a estas regresiones simples se obtienen regresiones de 2 variables para estimar en función de las medidas de resistógrafo y la densidad, la resistencia a compresión en cada caso.

Probetas Tipo B	$\sigma_c = 0,421RM + 646,577d - 69,063$	$R^2=0,492$
Probetas Tipo C	$\sigma_c = 0,814RM + 22,218d - 21,247$	$R^2=0,721$

La principal conclusión de este estudio es que siempre que las cargas y el ensayo de penetración estén realizados en la misma dirección los resultados pueden representar las propiedades básicas de la madera. Asimismo, los mejores resultados son obtenidos para la compresión y penetración radial (probetas Tipo C). Las pruebas resistográficas en las probetas Tipo A son útiles para conocer el área de sección dañada.

En 2007, **Lourenço et al.** desde la Universidad de Miño y el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa abordan un trabajo en el que evalúan la resistencia a compresión de la madera de castaño utilizando métodos de ensayos destructivos y no destructivos, entre los que se encuentra el resistógrafo.

Las probetas son divididas en dos grupos: madera de castaño nueva y vieja. A su vez cada uno de los grupos es dividido en cuatro subgrupos de acuerdo con la orientación de los anillos de crecimiento con respecto a la dirección de carga.

El tamaño de las probetas es de 50x50x300 mm. Sobre estas probetas se realizan ensayos de ultrasonidos y, posteriormente, se dividen en 3 probetas de 50x50x100 mm, dos de las cuales se rompen a compresión y sobre la otra se realizan ensayos con resistógrafo y pilodyn. En total se realizan ensayos de resistógrafo sobre 80 muestras y se ensayan hasta rotura 160.

Los resultados revelan que las relaciones entre las medidas de resistógrafo y la densidad para ambos grupos presentan un alto grado de dispersión y no se puede encontrar una correlación fiable entre ambas magnitudes:

Madera nueva	$d = 470 + 0,43 RM$	$R^2=0,36$
Madera vieja	$d = 225,02 + 1,55 RM$	$R^2=0,38$

siendo en cada caso;

$d$	Densidad de la madera en Kg/m <sup>3</sup>
RM	Medida de resistógrafo en Bits en un rango de 0 a 600

Por otro lado, las relaciones obtenidas entre las medidas de resistógrafo y el módulo de elasticidad muestran, para ambos casos, un grado de correlación lineal débil siendo necesario utilizar diferentes correlaciones de acuerdo con la orientación de la carga y la edad de la madera. Asimismo, las relaciones entre la resistencia a compresión y las

medidas de resistógrafo ofrecen correlaciones lineales débiles siendo necesario, igualmente, utilizar diferentes correlaciones de acuerdo a la orientación de carga y la edad de la madera. Las correlaciones obtenidas oscilan desde  $R^2=0,47$  hasta  $R^2=0,78$  dependiendo de la orientación de la fibra y la edad de la madera.

En 2010 **Acuña et al.** desde la Universidad de Valladolid presentan un trabajo en el que aplican el resistógrafo para la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera.

Para realizar este estudio emplean probetas de 150x100x100 mm de 6 especies distintas (coníferas y frondosas). Los ensayos son realizados en la dirección radial atravesando los anillos perpendicularmente.

Los resultados aportan una buena correlación entre la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo, reflejada mediante la expresión:

$$d = 394,797 + 0,7598 \text{ RM} \quad R^2=0,81$$

siendo;

d Densidad de la madera en Kg/m<sup>3</sup>

RM Medida de resistógrafo en Bits en un rango de 0 a 800

En cuando a la diferenciación de especies de madera, los resultados no parecen tan claros. Mientras que los resultados obtenidos para las 3 especies de frondosas presentan una gran variabilidad, los resultados entre las 3 especies de pinos presentan grandes semejanzas resultando cuestionable su fiabilidad.

En 2011 **Dulce Franco et al.** desde el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto Superior de Ingeniería y el Laboratorio de Ingeniería Civil de Lisboa presentan una investigación en el que estiman algunas propiedades de la madera usando pylodin y resistógrafo.

Para el estudio se emplean 174 probetas de madera de pino, de las especies *Pinus pinaster* y *sylvestris*, con un tamaño de 30x60x180 mm.

Los resultados muestran una buena relación entre la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo expresada mediante la ecuación:

$$d = 165,933 + 35,0877 \text{ RM} \quad R^2=0,87$$

siendo;

d Densidad de la madera en Kg/m<sup>3</sup>

RM Medida de resistógrafo en Bits en un rango de 0 a 20

Asimismo, en este caso la correlación obtenida entre las medidas de resistógrafo y la resistencia a compresión de la madera arroja mejores resultados que los obtenidos por Ceraldi. El coeficiente de correlación,  $R^2$ , obtenido es de 0,70.

Los resultados de los trabajos expuestos reflejan que, aunque no es el objetivo original del resistógrafo, es posible obtener la densidad de una madera a partir de ensayos con el resistógrafo.

No obstante, debe señalarse que ninguna de las investigaciones referidas expone una metodología clara de aplicación in situ en una obra de rehabilitación, limitándose a hacer descripciones de la técnica y extraer correlaciones.

#### **IV.1.4.2. Aplicación del resistógrafo a la evaluación de estructuras en servicio**

La aplicación del resistógrafo para la evaluación de estructuras en servicio fue implantada inicialmente en Europa, y especialmente en Alemania, para la inspección de forjados. El resistógrafo permitía determinar el área deteriorada en una viga/par para su posterior saneamiento.

Desde entonces varios autores la han empleado para evaluar estructuras en servicio con el objetivo de detectar deterioros internos en los elementos estudiados.

En 2005, en las I Jornadas de Investigación en Construcción, **Álvarez, L. et al.**, desde la Universidad de Valladolid, presentan un estudio sobre la aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructuras de madera. En este trabajo desarrollan una nueva técnica para el diagnóstico de “zonas ocultas que son de difícil o imposible peritación por métodos visuales o convencionales”.

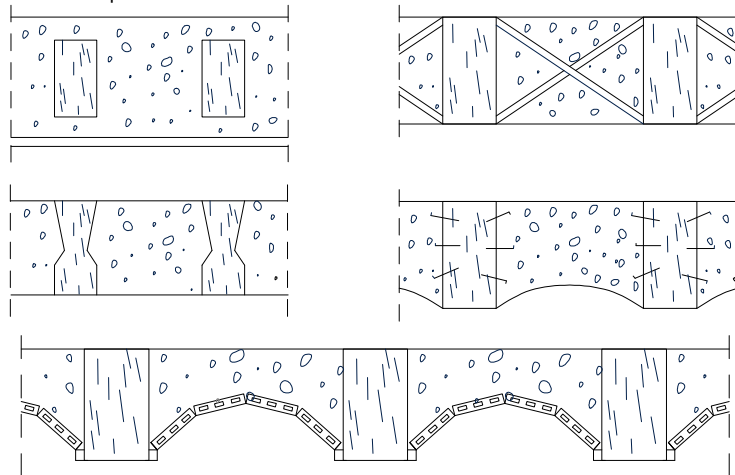
En 2007, **Liliana Palaia** desde la Universidad de Valencia presenta a un congreso un análisis sobre los fallos estructurales de los forjados y cubiertas de edificios antiguos en Valencia. Propone una metodología de análisis para determinar el estado de conservación y las causas del deterioro en los edificios. En este proceso incluye el resistógrafo como herramienta no destructiva para la evaluación de las zonas ocultas de las estructuras.

En 2008 presenta a un congreso el proceso de evaluación de una estructura de madera en servicio, la Villa Ivonne en Meliana. En esta metodología propone combinar métodos de ensayos no destructivos con los métodos tradicionales de inspección visual con el objetivo de no dañar la estructura existente. Como técnicas no destructivas propone el uso de los ultrasonidos, el medidor de la dureza/densidad superficial de la madera, Pylodin, y el resistógrafo.

#### **IV.1.4.3. La inspección de forjados de entrevigado cuajado**

Dentro del campo de inspección de estructuras en servicio con resistógrafo, los forjados de entrevigado cuajado, por su configuración constructiva, pueden suponer un capítulo importante.

Los forjados de entrevigado cuajado se caracterizan por tener relleno todo el entrevigado con cascotes y yeso (Figura IV.49). La adherencia a la vigueta se refuerza con entomizado, ensamble, tornapuntas cruzadas o nudillos. Estos, con el paso del tiempo y con el fin de aligerar el peso muerto que constituye el relleno (revoltón) han ido sustituyendo parte del mismo por piezas cerámicas (rasillas) que actúan de encofrado perdido formando arcos de descarga que son el precedente de las bovedillas actuales.



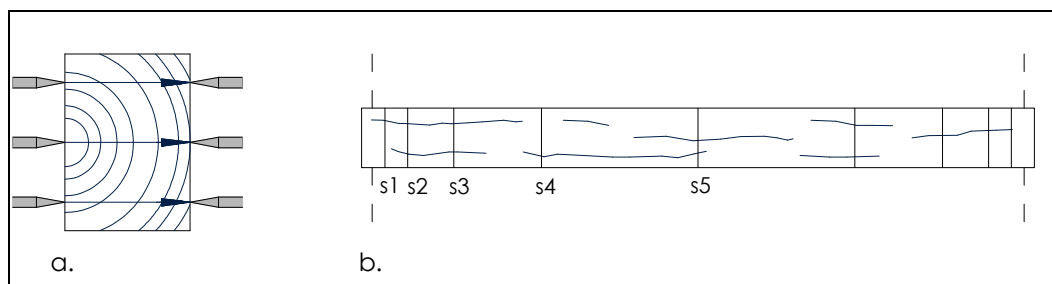
**Figura IV.49.** Tipología de forjados de entrevigado cuajado. (Casinello Pérez, F. “Construcción. Carpintería”)

Esta configuración constructiva permite mejorar las condiciones de aislamiento y la protección contra el fuego. No obstante, a pesar de la mejora de estas condiciones, la morfología constructiva de este tipo de forjados propicia el deterioro por pudrición de sus vigas de madera. La humedad, procedente de alguna fuga en las instalaciones del edificio o debida a las infiltraciones, queda retenida en el material de relleno del entrevigado provocando el deterioro por pudrición de las vigas del forjado. El patrón de pudrición de este tipo de forjados responde a estos esquemas:

- 1) *Pudrición superior de las vigas:* Es la pudrición típica de este tipo de forjados provocada por la humedad retenida en el material de relleno del entrevigado.
- 2) *Pudrición lateral de las vigas:* Este tipo de pudrición aparece fundamentalmente en las vigas de patio en las que una de sus caras laterales está al descubierto.
- 3) *Pudrición aleatoria de las vigas:* Este es el patrón de pudrición típico producido por un ataque de termitas.

En ninguno de los casos debe olvidarse la pudrición de las cabezas de las vigas en las zonas de empotramientos.

La morfología constructiva de los forjados de entrevigado cuajado limita sus labores de inspección y diagnóstico. Las vigas que componen estos forjados quedan embebidas en el material de relleno del entrevigado mostrando al exterior, únicamente, su cara inferior. Esta situación dificulta su inspección e impide la aplicación de las metodologías de inspección mediante ultrasonidos desarrolladas por este Grupo de Investigación para la inspección de forjados de madera. Estas metodologías requieren el acceso por las dos caras laterales de las vigas debiendo quedar éstas al descubierto (Figura IV.50.):



**Figura IV.50.** Metodología de ultrasonidos aplicada a la inspección de forjados (a. Medidas realizadas en cada sección, b. Selección de secciones en las vigas).

Los resultados de estas mediciones permiten estimar:

- En madera sana: A partir de la velocidad longitudinal y la densidad, es posible obtener el módulo de elasticidad dinámico a partir del cual es posible deducir el módulo de elasticidad estático y estimar la resistencia, obteniendo, de este modo, su clasificación resistente.
- En madera deteriorada: A partir de las velocidades normales (perpendiculares a la fibra) es posible deducir las pérdidas de densidad de las piezas, debida a ataques por insectos xilófagos y/o pudrición, y relacionarlas con su capacidad resistente residual.

A pesar de la utilidad de la metodología desarrollada, su aplicación resulta inviable por la morfología constructiva de estos forjados y la propia morfología de los equipos de ensayo.

En esta situación el procedimiento operatorio del resistógrafo se perfila como una técnica viable que permite resolver las tareas de inspección de este tipo de forjados. De esta forma de una inspección resistográfica en este tipo de forjados sería posible obtener:

- En madera sana: Estimación de la densidad de la madera que conforma la estructura a través de las correlaciones obtenidas.
- En madera deteriorada: Localización del deterioro en la sección ensayada.

Sin embargo, a pesar de las bondades del resistógrafo no se debe perder de vista que las estimaciones realizadas son puntuales y no son, por tanto, extrapolables a las piezas completas. Este hecho nos conduce a plantear la necesidad de una metodología para la inspección de este tipo de forjados mediante técnicas de inspección que nos ofrezcan lecturas globales de las piezas.

### Notas del capítulo:

#### Libros

Casinello Pérez, F. "Construcción. Carpintería". Editorial Rueda. Madrid (1993).

#### Tesis doctorales

Gantz, C. "Evaluating the efficiency of the resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species". North Carolina State University. Department of Forestry (2002).

#### Artículos

Acuña, L., Basterra, L.A., Casado, M.M., López G, Ramón-Cueto, G, Relea, E, Martínez C, González, A. "Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera". *Materiales de la Construcción* (2010), doi:10.3989/mc2010.57610.

Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., Mazzolani, F.M. "Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements". *Engineering Structures* (2009), doi:10.1016/j.engstruct.2009.10.006.

Carballo Collar J., Hermoso Prieto E., Díez Barra R. "Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España". *Kurú: Revista Forestal*. Vol. 6 (2009).

Ceraldi, C., Mormone, V., Russo Ermolli, E. "Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics". *Materials and Structures*. Vol 34. January-February (2001). pp 59-64.

Fikret Isik and Bailian Li. "Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs". *Canadian Journal Forest Research*. Vol. 33. (2003). pp 2426-2435.

Lourenço, P., Feio, A., Saporiti Machado, J. "Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood". *Construction and Building Materials*. Vol 21 (2007). pp 1617-1627.

#### Congresos

Alvarez, L, Basterra, A., Casado Sanz, M., Acuña Rello, L. "Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera". *Actas de las I Jornadas de Investigación en Construcción*, Madrid España 2-4 Junio 2005.

Henriques, D., Nunes, L., Saporiti Machado, J., De Brito, J. "Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn and Resistograph". *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Porto Portugal, 12-15 April 2011.

Palaia, L. Structural failure analysis of timber floors and roofs in ancient buildings at Valencia (Spain). *ICOMOS IWC- XVI International Symposium*, Florence, Venice and Vicenza, 11-16 November 2007.

Palaia, L, Monfort J, Sánchez R, Gil L, Álvarez A, López V, Tormo S, Pérez C, Navarro, P. Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones. *9<sup>th</sup> International Conference on NDT of Art*, Jerusalem Israel, 25-30 May 2008.

Rinn, F. "Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from RESISTOGRAPH micro-drillings". *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Non Destructive Testing of Wood*, Wisconsin USA, 22-24 September 1993.

Rinn, F. "One minute pole inspection with RESISTOGRAPH micro drillings". *International Conference on wood poles and piles*, Fort Collins Colorado, 21-23 March 1994.

Tseng, Y. J., Hsu, M. F. "Evaluating the Mechanical Properties of Wooden Components Using Drill Resistance Method". In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, pp 303-310. Miyazaki, Japan. 2-5 June 2008.

## **IV.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA: ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

---

IV.2.1. ESCUADRÍAS DE ENSAYO. MADERA LIBRE DE DEFECTOS Y MADERA ESTRUCTURAL

IV.2.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO. NORMAS UNE EN 408, 384, 338, 1912.





#### IV.2.1. ESCUADRÍAS DE ENSAYO: MADERA LIBRE DE DEFECTOS Y MADERA ESTRUCTURAL

La madera es un material heterogéneo debido a su naturaleza biológica. Esta cualidad genera que su estudio como material estructural pueda ser enfocado desde dos perspectivas:

- Como material libre de defectos y singularidades (nudos, fendas, desviación de la fibra,...). Para este estudio deben emplearse probetas de reducidas dimensiones y libres de defectos, son las denominadas pequeñas probetas, reconocidas en la norma española UNE 56537:1979. Esta norma fija el tamaño de estas probetas en una longitud de 300 mm y una sección transversal de 20x20 mm.
- Como material heterogéneo con defectos. El tamaño de las probetas se ajusta a su aplicación estructural de una obra real y presenta sus singularidades habituales.

Actualmente el procedimiento de obtención de las propiedades físicas y mecánicas de la madera se ajusta a este último modelo estudiando piezas de tamaño comercial. No obstante, hasta finales de la década de los 70 del siglo pasado el estudio de la madera era realizado a través de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Los métodos de cálculo de estructuras de madera seguían el formato de las tensiones admisibles del material. Esta tensión admisible o resistencia se obtenía a partir de un percentil (normalmente el 5%) de la distribución normal de la resistencia, al que se aplicaban una serie de ajustes por duración de la carga, humedad, altura de la sección, calidad y coeficiente de seguridad global. Este procedimiento de análisis se llevó a cabo en los estudios anteriores realizados dentro del grupo de investigación por Rodríguez Liñán y Rubio de Hita.

A partir de los 70 este procedimiento se pone en cuestión como sistema válido para predecir el comportamiento estructural de la madera como material que presenta singularidades y donde el tamaño de las piezas se ajusta a formatos comerciales alejándose de la realidad del ensayo. **Madsen** de la Universidad Columbia Británica, en Canadá, realizó un estudio experimental para comprobar la validez de dicho sistema. Analiza el diferente planteamiento de la investigación con probetas pequeñas y libres de defectos frente a la madera de tamaño estructural, así como la influencia de la metodología de ensayo desarrollada en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos de estos trabajos demostraron que el empleo de pequeñas probetas, con la fibra recta y libres de defectos debe reservarse fundamentalmente para el estudio científico de la madera producida por el árbol. No obstante, en el estudio de las piezas de tamaño estructural se refleja el comportamiento real del material en su aplicación constructiva.

En el sistema de estudio con pequeñas probetas y libres de defectos el efecto de la calidad de la madera se introducía con una serie de factores de corrección de la resistencia en función de la calidad de la pieza comercial. No obstante, esta corrección era idéntica para todas las especies de madera lo cual suponía una simplificación no aceptable en muchos casos. Todo ello condujo a Madsen a concluir que el procedimiento empleado no era válido y que era necesario buscar un método de estudio alternativo donde se tuviesen en cuenta las variables de tamaño de la pieza y la presencia de singularidades.

Actualmente, la caracterización de la madera estructural se realiza mediante ensayos con probetas de tamaño estructural y con la calidad comercial correspondiente. En el caso de Europa, los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se realizan de acuerdo con la norma UNE EN 408:2004, en la que se establece que el procedimiento de determinación de propiedades mecánicas mediante pequeñas probetas y libres de defectos se reserva exclusivamente para las frondosas. Asimismo, la estimación de los

valores característicos se realiza de acuerdo con la norma UNE EN 384:2004. Estos valores característicos de las propiedades mecánicas que se obtiene para cada calidad quedan asignados a un sistema de clases resistentes definido en la norma UNE EN 338:2003; con el fin de simplificar el manejo de la gran diversidad que supondría considerar las combinaciones de especie, procedencia y calidad.

#### **IV.2.1.1. Estudio del “efecto de tamaño” en los parámetros resistentes**

La resistencia de la madera depende, entre otros factores, del tamaño de la pieza. Esta particularidad del material que se conoce por “efecto de tamaño”, supone una complicación añadida al proceso de caracterización y de cálculo, si se compara con otros materiales. El “efecto de tamaño” ha sido estudiado y sobre todo, experimentado en la madera, desde la segunda década del siglo pasado.

Los primeros estudios sobre el “efecto del tamaño” en la resistencia de la madera fueron realizados por **Newlin y Trayer** en los años 20. Analizan la relación entre la resistencia a flexión de vigas de madera y la altura de sus secciones, estudiando este fenómeno hasta una altura de 300 mm tomando como referencia una altura de 50 mm. En 1947, **Dawley y Youngquist** continúan estos trabajos avanzando hasta estudiar vigas con una altura de sección de 400 mm.

Estas experiencias son publicadas por **Freas y Selbo** en 1954, y sus conclusiones son recogidas en la normativa de cálculo de Estados Unidos como factor de altura para el ajuste de la resistencia a flexión.

En 1939, **Weibull** propone una teoría con carácter más amplio sobre el efecto del tamaño considerando, en este caso, el efecto del volumen. Esta teoría está basada en la concepción estadística de la resistencia y se fundamenta en el hecho de que existe una mayor probabilidad de que haya una zona de baja resistencia en una pieza de gran volumen frente a una pieza de pequeño volumen.

Su generalidad se asienta en que la relación se establece entre resistencia y volumen, en lugar de entre resistencia y altura de la sección. Se denomina “teoría del eslabón más débil”, y supone que el fallo de la pieza se produce cuando la tensión alcanza el mismo valor que la tensión que produciría el fallo del elemento más débil contenido en su volumen si se ensayara independientemente.

Esta hipótesis se cumple en materiales con un mayor comportamiento frágil. En los materiales de comportamiento dúctil, su validez es menor, ya que cuando una parte de la pieza alcanza la tensión máxima es posible una redistribución de las tensiones alcanzando cargas de rotura mayores.

Esta teoría del eslabón más débil fue aplicada por primera vez a la madera por **Bohannon** en los años 60, estudiando la influencia del tamaño en la resistencia a flexión. Sin embargo, en su trabajo encontró un mejor ajuste con los resultados experimentales si en lugar de utilizar el volumen de la pieza, empleaba simplemente la longitud de la pieza y el canto de la sección.

En 1974, **Barrett** de la Universidad de Columbia, Canadá, comprueba el efecto del tamaño en la resistencia a tracción perpendicular a la fibra en la madera de pino Oregón. En 1976, **Mau** constata que este efecto es más acentuado en la madera laminada encolada. La resistencia a cortante también muestra cierta dependencia del tamaño de la pieza, como observan **Foschi y Barrett** en sus trabajos de investigación.

Asimismo, en 1990, **Lam et al.** estudian nuevamente el efecto de la longitud en piezas sometidas a esfuerzos de tracción. En estas piezas el esfuerzo axial suele ser constante a lo largo de toda la pieza. Por tanto, cualquier sección se encuentra sometida a la misma tensión y el fallo se produciría en la sección más débil. Es fácil entender que cuanto mayor sea la longitud de la pieza mayor será la probabilidad de encontrar el defecto pésimo de

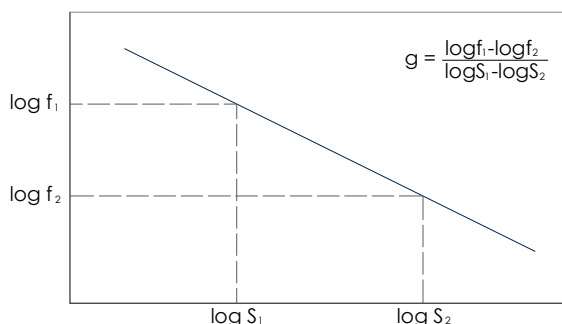
la calidad de la madera, y por tanto, el valor característico de la resistencia será menor. La sección más débil lo será por la existencia de singularidades, como nudos, que suponen una discontinuidad de las fibras, y por tanto una aumento de la tensión; o bien, por la desviación de la fibra, que conduce también a una disminución de la resistencia.

Para piezas sometidas a compresión, la situación es similar, pero con algunas particularidades. El fallo por compresión, sin posibilidad de pandeo, presenta un comportamiento mucho más dúctil que el fallo por tracción, de comportamiento frágil. Por tanto, una sección sometida a una tensión de compresión elevada a causa de los defectos existentes, puede admitir más carga al plastificarse parcialmente la sección. Por esta razón, el efecto del tamaño es menos marcado en la compresión.

En las piezas sometidas a flexión la situación es más compleja. Si sobre un conjunto de piezas de madera de la misma calidad estructural, se realizan ensayos de flexión y se divide la muestra en dos lotes, uno con luz mayor que el otro, se obtiene un valor característico de la resistencia mayor en las piezas de menor longitud. Normalmente, la ley de momentos flectores es variable a lo largo de la longitud y los valores máximos se alcanzan en unas zonas determinadas. Además, la distribución de las tensiones debidas a la flexión da lugar a una ley triangular en la que los valores máximos se alcanzan en las fibras extremas de la sección. De este modo, la posibilidad de que los defectos más graves queden situados en la zona de mayor tensión, es más baja cuanto más pequeña sea la pieza. En esta situación, la resistencia obtenida depende además de la disposición de las cargas.

Si se ensayan a rotura dos grupos de piezas de tamaños  $S_1$  y  $S_2$ , se obtienen los valores característicos de las resistencias  $f_1$  y  $f_2$ , respectivamente. La diferencia del tamaño puede deberse a la altura de sección ( $h$ ), la longitud de la pieza ( $l$ ) o a su volumen ( $V$ ). La relación entre el tamaño y la resistencia puede expresarse como una relación lineal de logaritmos.

Se define como parámetro del efecto del tamaño, la pendiente de esa relación lineal,  $g$ , representada en la Figura IV.51.:



**Figura IV.51.** Relación entre resistencia y tamaño. (Lam et al., 1990)

La relación,  $k$ , entre las resistencias para cada tamaño es, por tanto:

$$k = \frac{f_1}{f_2} = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^g$$

#### **IV.2.1.2. Coeficientes de relación entre el tamaño de las piezas y la resistencia**

**Madsen y Barrett** resumen los resultados obtenidos en sus numerosos trabajos de investigación respecto al parámetro del efecto del tamaño, y proponen los siguientes valores para cada propiedad:

### *Resistencia a flexión:*

Efecto de la longitud:  $g = 0,17$  a  $0,20$ .

Efecto de la altura: Para la altura de la sección no parece detectarse este efecto. No obstante, la relación entre la longitud y la altura de la sección es prácticamente constante en las piezas estructurales en flexión, con lo que el parámetro puede considerarse el mismo para ambas dimensiones.

Efecto de la anchura: El efecto de la anchura no se aprecia en la madera limpia, pero en el caso de la madera comercial con singularidades el fenómeno es contrario a la longitud, de manera que a mayor anchura la resistencia aumenta. El parámetro se estima como  $g = -0,23$ .

### *Resistencia a tracción paralela a la fibra:*

Efecto de la longitud:  $g = 0,18$ . Es aceptable unificarlo con el  $0,20$  de la flexión.

Efecto de la altura:  $g = 0,10$ .

### *Resistencia a compresión:*

Efecto de la longitud:  $g = 0,10$

Efecto de la altura: No se considera el efecto de la altura.

Efecto de la anchura: No se considera el efecto de la anchura.

En la práctica, el **Eurocódigo 5** toma los siguientes valores:

### *Resistencia a flexión:*

Efecto de la altura:  $g = 0,20$

Efecto de la anchura: No se considera el efecto de la anchura.

### *Resistencia a tracción paralela a la fibra:*

Efecto de la altura:  $g = 0,20$

Efecto de la anchura: No se considera el efecto de la anchura.

### *Resistencia a tracción perpendicular a la fibra:*

Efecto del volumen:  $g = 0,20$  (madera laminada encolada)

### *Resistencia a compresión:*

No se considera el efecto del tamaño.

### *Resistencia a cortante:*

No se considera el efecto del tamaño.

En **España**, los coeficientes de tamaño han sido estudiados para algunas de las especies españolas por investigadores del INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias).

En 2002, **Hermoso et al.** presentan un análisis del factor de altura  $k_h$ , en la madera aserrada estructural de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) obteniendo los siguientes resultados:

*Resistencia a flexión:*

Efecto de la altura:  $g = 0,20$  (esbeltez constante longitud/altura).

Efecto de la anchura: El efecto de la anchura no resulta significativo en la calidad superior (ME-1), y es del orden de,  $-0,20$ , en la calidad inferior (ME-2).

En la misma línea, **Fernández-Golfín et al.** incorporan la especie de pino laricio (*Pinus Nigra* subs. *Salzmanii* (Dunal) Franco) a estos estudios. Los resultados de estos estudios mostraron que el efecto de la altura de la pieza en esta especie resultó muy superior al del pino silvestre, alcanzando un valor de  $g = 0,51$ .

En ambos estudios la altura de sección tomada como referencia es de 150 mm.

El actual **Documento Básico de Seguridad Estructural Código Técnico de la Edificación** establece una corrección de la resistencia característica a flexión y a tracción con respecto a una pieza de referencia de canto 150 mm a partir de la siguiente expresión:

$$K_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} < 1,3$$

siendo  $h$  el canto real de pieza.

Este factor es aplicable a las especies de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L), laricio (*Pinus nigra* Arnold), insignis (*Pinus radiata* D. Don) y pinaster (*Pinus Pinaster* Ait).

Según el CTE (Código Técnico de la Edificación) la resistencia a flexión disminuye al aumentar las dimensiones de la pieza.

Todo lo expuesto nos lleva a concluir que es necesaria una revisión de los estudios realizados con pequeñas probetas dentro del grupo adaptándose a la nueva realidad en la que la caracterización de los parámetros resistentes de la madera se realiza mediante ensayos en probetas con tamaño estructural.

### Notas del capítulo:

#### Normativa

UNE 56537:1979. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a flexión estática"

UNE EN 1995-1-1. "Eurocódigo 5. Estructuras de Madera.

UNE EN 338:2010. "Madera estructural. Clases resistentes".

UNE EN 408:2004. "Estructuras de Madera. Madera aserrada y laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

UNE EN 384:2010. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad".

UNE EN 1912:2005. "Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de las calidades visuales y especies".

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural en Estructuras de Madera. Ministerio de la Vivienda. Marzo 2006.

UNE EN 14081-1:2006. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales". Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos adicionales para ensayo de tipo inicial". Parte 3: Requisitos adicionales para el control de la producción".

#### Libros

Barrett, J.D. and Lau, W. "Canadian lumber properties". Canadian Wood Council, Ottawa (1994). 346 pp.

Freas, A.D. and Selbo, M.L. "Fabrication and design of glued laminated wood structural members". United States Department of Agriculture. Technical Bulletin (1954).

Madsen, B. "Structural behaviour of timber". Timber Engineering LTD. Canada (1992).

Newlin, J.A., Trayer, G.W. "Form factor of beams subjected to transverse loading only". NACA. N° 181 (1924).

Bohannon, B. "Effect of size on bending strength of wood members". *United States. Forest Service Research Paper*. FPL 56. (1966) 30 pp.

#### Tesis

Mau, T.J. "Time and size effects for tension perpendicular to grain in wood". University of British Columbia. Department of Civil Engineering. 1976.

Iñiguez González, G. "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes. 2007.

#### Artículos

Barrett, J.D. "Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas Fir". *Wood and Fibre*. Vol. 6. N° 2. (1974). Pp. 126-143.

Fernández-Golfín, J.I., Hermoso, E., Díez, M.R. "Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española". *Materiales de Construcción*. Vol. 52, N° 268. (2002). pp. 43-55.

Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R.. "Análisis del factor de altura kh en la madera aserrada estructural de pino silvestre". *Investigaciones Agrarias: Sist. Recur. For*. Vol. 11. N° 2. (2002). pp. 441-448.

Lam, F. and Varoglu, E. "Effect of length on the tensile strength of lumber". *Forest Products Journal*. Vol. 40. N° 5. (1990). pp.37-42.

Madsen, B. and Buchanan, A.I. "Size effects in timber explained by a modified Weakestlink theory". *Canadian Journal Civil Engineering*. Vol. 13. N° 2. (1986). pp.218-232.

#### IV.2.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO. NORMAS UNE EN 408, 384, 338, 1912.

Todas las técnicas de inspección de estructuras de madera basadas en métodos no destructivos que utilizan valores estadísticos basados en la experiencia para predecir la resistencia residual de una estructura. Esos datos nos pueden ofrecer una información más o menos aproximada, según la rigurosidad del método, para poder establecer un diagnóstico sobre el estado de conservación de una estructura de madera. No obstante, para poder determinar cuantitativamente las capacidades mecánicas reales de una estructura es necesario recurrir a ensayos destructivos que nos proporcionan los valores objetivos de cada pieza. Aún así, salvo que estos ensayos sean realizados en condiciones análogas, los resultados obtenidos en cada pieza no podrán ser comparados entre sí. La longitud de las piezas, su canto, el contenido de humedad o la velocidad de la carga aplicada, son algunos de los factores que intervienen directamente en los resultados que se obtienen y que impiden que los valores obtenidos sean comparables. En este sentido, se ha elaborado una base normativa de ensayo a nivel europeo donde se desarrolla el procedimiento de ensayo a emplear en cada caso y se parametrizan cada uno de los factores intervinientes. De este modo los resultados obtenidos bajo unas condiciones concretas son extrapolables a otras situaciones.

Esta base normativa está compuesta por las siguientes normas UNE:

- Norma UNE EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- Norma UNE EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- Norma UNE EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.
- Norma UNE EN 1912:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

##### **IV.2.2.1. La norma UNE EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas**

La norma UNE 408:2011 está basada en la Norma ISO 8375 y en ella se establecen métodos para la determinación en laboratorio de algunas propiedades físicas y mecánicas de piezas de madera en sus dimensiones reales de empleo:

- módulo de elasticidad (local y global) y resistencia en flexión,
- módulo de elasticidad transversal,
- módulo de elasticidad y resistencia en tracción paralela a la fibra,
- módulo de elasticidad y resistencia en compresión paralela a la fibra,
- módulo de elasticidad y resistencia en tracción perpendicular a la fibra,
- módulo de elasticidad y resistencia en compresión perpendicular a la fibra,
- resistencia a cortante paralelo a la fibra.

La edición de 2011 sustituye a la edición anterior de 2004. Esta edición de 2004 sustituía a la edición de 1995 y a la norma EN 1193 de 1997.

En la edición de 2011 se cambia el ensayo para la determinación del esfuerzo cortante en la dirección paralelo a la fibra. Asimismo, en la edición de 2004 se añadía el módulo de elasticidad global en flexión y se renombraba el ensayo ya existente como módulo de elasticidad local. Asimismo se incluyeron métodos para la determinación de la resistencia a cortante y propiedades mecánicas en dirección perpendicular a la fibra, anteriormente incluidas en la Norma EN 1193 ya anulada.

Determinación de las propiedades físicas de las probetas de ensayo

- Dimensiones

Las dimensiones de las probetas deben medirse con una precisión del 1% y a una distancia mínima de 150 mm de las testas. Si la anchura o el grosor varían dentro de una misma pieza estas dimensiones deberán estimarse como la media de tres comparaciones efectuadas en diferentes puntos a lo largo de cada probeta.

- Humedad y densidad

La humedad y densidad de las probetas se determinan sobre una rebanada tomada de la probeta. En ambos casos, para la madera estructural, se debe tomar una rebanada de la sección completa, libre de nudos y bolsas de resina. La medición de la humedad debe realizarse de acuerdo con el procedimiento de la Norma EN 13183-1.

Para los ensayos de resistencia la sección se debe tomar tan cerca como sea posible de la zona de rotura.

Para las probetas de ensayos en dirección perpendicular a la fibra, la densidad se debe determinar previamente al ensayo, después del acondicionamiento, partiendo de mediciones de masa y volumen de la probeta completa.

- Acondicionamiento de las probetas:

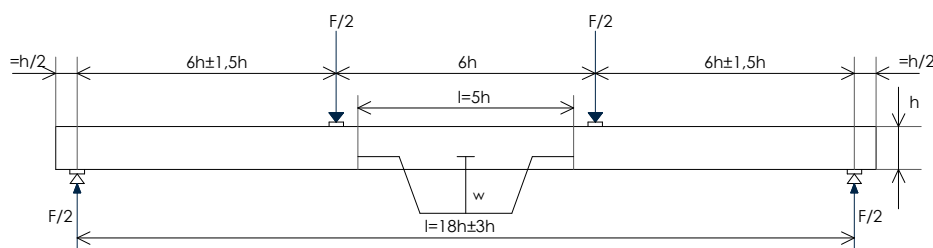
Los ensayos se deben llevar a cabo sobre probetas acondicionadas en una atmósfera normalizada de  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  y  $(65 \pm 5)\%$  de humedad relativa. Se considera que la probeta está acondicionada cuando llega a masa constante. Se considera que se ha alcanzado una masa constante cuando dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 horas, difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

Determinación de los módulos de elasticidad (local y global) y de la resistencia en flexión

A partir de una metodología de ensayo la norma UNE 408 permite extraer datos para el cálculo de los módulos de elasticidad en flexión (local y global) y la resistencia a flexión.

Este ensayo se realiza sobre una probeta simplemente apoyada con una luz igual a 18 veces su altura que se carga en flexión sobre dos puntos simétricos (Figura IV.52.). Si la probeta y el dispositivo de ensayo no permiten aplicar exactamente estas condiciones, se admite modificar la distancia entre los puntos de carga y los apoyos 1,5 veces la altura de la probeta y la longitud de la probeta puede modificarse en una cantidad no superior a 3 veces la altura, conservando siempre en el ensayo las condiciones de simetría.

Para la determinación de los módulos de elasticidad (local y global) la carga se debe aplicar con una velocidad constante no superando los 0,003 h mm/s y la carga máxima no debe superar  $0,4 F_{\max}$ , siendo  $F_{\max}$  la carga de rotura de la probeta. Esta carga media de rotura ( $F_{\max}$ ) del material ensayado se debe obtener con los resultados de 10 probetas como mínimo, de la especie, tamaño y calidad adecuados.



**Figura IV.52.** Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión. (UNE EN 408:2011)

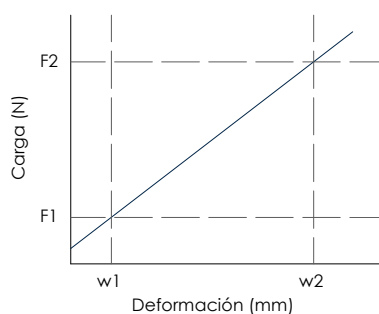


En todos los casos, módulos de elasticidad y determinación de la resistencia a flexión, el dispositivo de carga utilizado debe permitir la medición de la fuerza con una precisión del 1% de la carga aplicada y para cargas inferiores al 10% de la carga máxima con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada. Asimismo, debe ser capaz de medir las deformaciones con una precisión del 1%, o para flechas inferiores a 2 mm con precisión de 0,02 mm.

Para la determinación del módulo de *elasticidad local*, la deformación  $w$ , debe tomarse como la media de las mediciones en ambas caras en el eje neutro, y debe medirse en el punto medio de un segmento de longitud igual a 5 veces la altura de la probeta. El valor de este módulo así obtenido se denomina "verdadero" ya que está libre de esfuerzo cortante puesto que en el tercio central de la viga el cortante es nulo.

No obstante, para la determinación del módulo de *elasticidad global*, la deformación  $w$ , debe medirse en el centro de la luz y en el centro del eje de tracción o compresión. Cuando  $w$  se mide en el eje neutro, debe tomarse la media de las mediciones realizadas en ambas caras de la pieza.

Con los datos obtenidos en el ensayo se traza el gráfico carga-deformación (Figura IV.53.) y se emplea el tramo del gráfico comprendido entre  $0,1 F_{\max}$  y  $0,4 F_{\max}$  para un análisis de regresión. Se debe buscar el tramo más largo de esta sección que tenga un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor partiendo de la condición de que esta parte del gráfico incluya al menos el tramo comprendido entre  $0,2 F_{\max}$  y  $0,3 F_{\max}$ .



**Figura IV.53.** Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica. (UNE EN 408:2011)

A partir del gráfico carga-deformación se calculan los módulos de elasticidad (local y global) mediante las siguientes expresiones:

- Módulo de elasticidad local:

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 l (w_2 - w_1)} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- $a$  Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en mm (milímetros)
- $l_1$  Longitud base de medida, utilizada para la determinación del módulo de elasticidad, en mm (milímetros).
- $I$  Momento de inercia en mm (milímetros) elevados a la cuarta potencia.
- $F_2 - F_1$  Incremento de carga en N (newtons) en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.
- $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en mm (milímetros) correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

- Módulo de elasticidad global:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right]^2 \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en mm
- l Luz de flexión en m
- $F_2 - F_1$  Incremento de carga en N en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor
- $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en mm correspondiente a  $F_2 - F_1$

Finalmente, la resistencia a flexión se determina continuando el ensayo hasta la rotura de la probeta ( $F_{\max}$ ) con una velocidad de carga constante de tal manera que la carga máxima se alcance en  $(300 \pm 120)$  s.

Se debe registrar el tiempo de ensayo hasta la rotura de cada probeta, así como el valor medio. Se debe informar sobre aquellas probetas que hayan diferido en más de 120 s respecto de 300 s.

- Resistencia a flexión:

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en mm.
- $F_{\max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo.
- W Módulo resistente, en mm, elevados a la tercera potencia.

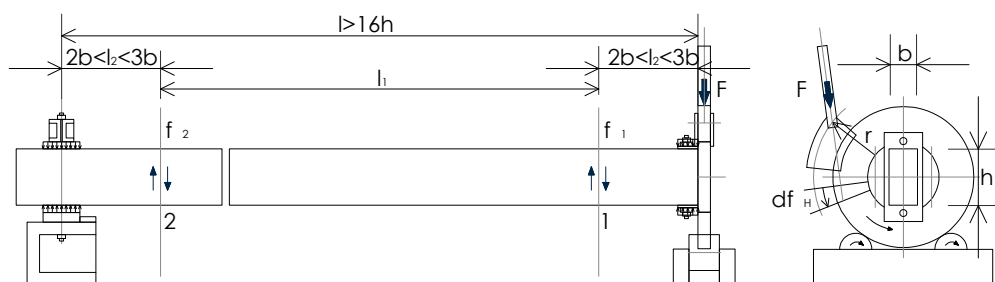
Debe anotarse, la forma de rotura y las características de crecimiento de la sección de rotura de cada probeta.

#### Determinación del módulo de elasticidad transversal o de cortante

La novedad de la edición de 2011 de la norma UNE EN 408 es la introducción de un nuevo método de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad transversal o de cortante. Para su cálculo la norma describe dos métodos de ensayo posibles: Método de torsión y Método de ensayo de campo de cizalladura.

El Método de torsión está basado en fijar la probeta en los apoyos que quedan separados 16 veces la dimensión mayor y se somete a torsión a lo largo de su eje longitudinal por giro relativo de los apoyos. La probeta debe montarse de forma que se reduzca al mínimo la deformación de la probeta por su peso propio. El par se aplica haciendo girar uno o los dos apoyos (Figura V.54).

<sup>2</sup> En la edición de la norma de 2011 se modifica la expresión matemática para el cálculo de  $E_{m,g}$ . No obstante, el desarrollo matemático de ambas expresiones coinciden y aportan resultados idénticos. En este trabajo se mantiene la nomenclatura de la edición de 2004 por ser la norma vigente durante el desarrollo de los trabajos.



**Figura IV.54.** Dispositivo de ensayo con los requisitos respecto a la colocación especificada de los captadores de giro. (UNE EN 408:2011)

Se mide el par y el giro relativo de dos secciones transversales, 1 y 2 (Figura V.54), separadas la longitud libre de ensayo  $l_1$ . La distancia entre el apoyo y estas secciones transversales,  $l_2$ , debe ser mayor o igual a dos veces el canto y menor o igual a tres veces el canto.

El par se aplica de forma que la velocidad relativa de giro en función del incremento de tiempo,  $d\Phi/dt$ , sea:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{f_{v,k} X}{225 G \eta} \left( \frac{l_1}{h} \right)$$

donde;

- $f_{v,k}$  Resistencia característica a cortante paralelo a la fibra en  $N/mm^2$ .
- $X$  y  $n$  Coeficientes de forma dados en función de la escuadría de la sección.
- $G$  Módulo de elasticidad transversal en  $N/mm^2$ .
- $l_1$  Longitud libre de ensayo.

La relación entre el par aplicado,  $T_r$  y el giro relativo,  $\Phi$  representada por la rigidez en torsión  $k_{tor}$  se determina aplicando una ecuación de regresión lineal en la que el coeficiente de correlación debe ser como mínimo 0,98.

El par máximo aplicado debería alcanzarse en menos de 150 s y no debe superar el límite de proporcionalidad o provocar daños en la probeta. Por ello el par se limita a:

$$T_r = \frac{2}{3} b^2 h f_{v,k} X$$

siendo;

- $T_r$  Par máximo en Nmm.

El dispositivo de carga debe permitir la medición del par con una precisión del 1% o para cargas inferiores al 10%, con una precisión del 0,1% del par máximo aplicado.

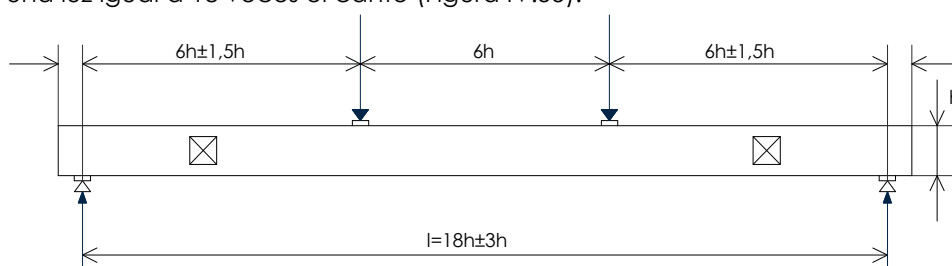
El módulo de elasticidad transversal  $G_{tor}$  se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$G_{tor} = \frac{k_{tor}}{\eta h b^3} l_1 \quad (N/mm^2)$$

donde;

- $n$  es un factor de forma dado.
- $G_{tor}$  Módulo de elasticidad transversal en torsión, en  $N/mm^2$ .

El Método de cizalladura consiste en cargar simétricamente la probeta a flexión 2 puntos, sobre una luz igual a 18 veces el canto (Figura IV.55).



**Figura IV.55.** Dispositivo de ensayo en el campo de cizalladura. (UNE EN 408:2011)

Este método de ensayo puede aplicarse juntamente con la determinación de la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad global. La carga se debe aplicar con una velocidad constante que no debe superar los 0,003 h mm/s. Asimismo, la carga máxima aplicada no debe superar 0,4  $F_{máx,est}$  o dañar la probeta, excepto si se realiza conjuntamente con el ensayo de determinación de la resistencia a flexión.

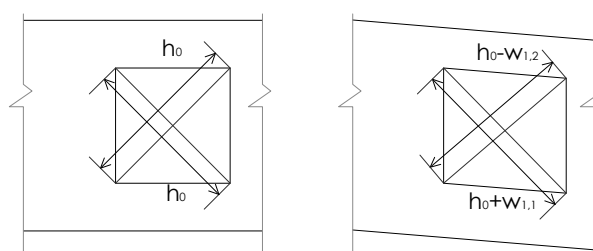
La carga máxima estimada  $F_{máx,est}$  del material ensayado se debe obtener tanto de los resultados de 10 probetas como mínimo, de la especie, tamaño y calidad adecuadas o partiendo de datos preexistentes adecuados.

En mitad de la superficie sometida al esfuerzo de constante de cizalladura, se traza en las 2 caras un cuadrado simétricamente al canto de la probeta. En los ángulos de la probeta se fija un dispositivo que permita medir la variación de las diagonales del cuadrado.

Las deformaciones se deben medir con una precisión del 1%, o para deformaciones inferiores a 2 mm con una precisión de 0,02 mm.

El dispositivo de carga debe permitir la medición de la carga con una precisión del 1% de la carga aplicada, o para cargas inferiores al 10% de la carga máxima aplicada con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada.

La deformación por cizalladura  $w$ , se define como el valor medio de la suma de las medidas absolutas de las 2 diagonales a cada lado de la sección (Figura V.56)



**Figura IV.56.** Deformación del cuadrado y las diagonales. (UNE EN 408:2011)

Para vigas de sección rectangular el módulo de elasticidad transversal en torsión,  $G_{tor,s}$ :

$$G_{tor,s} = a \frac{h_0}{bh} \frac{(V_{s,2} - V_{s,1})}{(w_2 - w_1)}$$

donde;

$$a = \frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{4h^2}$$

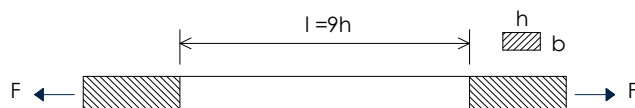
$w_2 - w_1$  Es el incremento de la deformación media de las 2 diagonales  $i$  de las caras opuestas de la viga en mm.

$V_{s,2} - V_{s,1}$  Es el incremento de la carga de cizalladura en newtons.

### Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia en tracción paralela a la fibra

Para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia en tracción paralela a la fibra la probeta debe tener una sección transversal completa y suficiente longitud, como mínimo 9 veces la mayor dimensión de la sección transversal (Figura IV.57.).

Para el módulo de elasticidad la carga se debe aplicar de forma continua con una velocidad no superior a 0,0005 l por s. Asimismo, la máxima carga aplicada a la probeta no debe superar el límite elástico ni causar daños a ésta. El dispositivo de carga debe permitir la medición de la fuerza con una precisión del 1% o para cargas inferiores al 10% de la carga máxima, con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada.



**Figura IV.57.** Ensayo para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia en tracción paralela a la fibra. (UNE EN 408:2011)

Por otro lado, la deformación  $w$ , debe medirse en un segmento de longitud igual a 5 veces la anchura de la sección de mayor dimensión de la pieza y separado del extremo de las mordazas, al menos 2 veces la anchura. Se medirá con una precisión del 1%, o para deformaciones menores que 2 mm, con una precisión de 0,02 mm.

El módulo de elasticidad en tracción,  $E_{t,0}$ , se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Siendo;

$F_2 - F_1$  Incremento de carga en la parte recta de la curva de carga-deformación en N  
 $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $F_2 - F_1$ .  
 $A$  Área de la sección transversal, en  $\text{mm}^2$ .

Si  $E_{t,0}$  se calcula partiendo de una regresión lineal carga/deformación, el cuadrado del coeficiente de correlación debería ser mayor que 0,99.

Finalmente, para la resistencia a la tracción paralela a la fibra se determina continuando el ensayo anterior hasta la rotura de la probeta.

La carga se debe aplicar con un desplazamiento constante de la cabeza de carga, de forma que se alcance la rotura de la pieza en  $(300 \pm 120)$  s. Se debe registrar el tiempo de ensayo hasta la rotura de la probeta, así como el valor medio. Se debe informar sobre aquellas probetas que hayan diferido en más de 120 s respecto de 300 s.

La resistencia a tracción se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$F_{\max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo.  
 $A$  Área de la sección transversal, en  $\text{mm}^2$ .

Debe anotarse la forma de rotura y las características de crecimiento en la sección de rotura de cada probeta. Si la rotura está relacionada de alguna manera con las mordazas, este hecho habrá de ser registrado.

Tanto el módulo de elasticidad como la resistencia en tracción paralela a la fibra se deben calcular con una precisión del 1%.

### Determinación del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión paralela a la fibra

Para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia en compresión paralela a la fibra la probeta debe tener sección transversal completa, y una longitud igual a seis veces la menor dimensión de la sección. Las testas deben mecanizarse con el fin de que resulten planas y paralelas entre sí, así como perpendiculares al eje de la pieza.

La carga debe aplicarse de manera concéntrica, por medio de un cabezal de carga esférico u otros dispositivos que permitan la aplicación de la carga de compresión sin introducción de esfuerzos en flexión. Después de aplicar una carga inicial, se debe bloquear la cabeza de carga para evitar desplazamientos angulares.

La carga se debe aplicar de forma continua con una velocidad no superior a 0,00005 l mm/s. El dispositivo de ensayo debe permitir la medición de la carga con una precisión del 1% de la carga aplicada en la probeta o para cargas inferiores al 10% de la carga máxima con una precisión del 0,1% de la carga máxima aplicada.

Las deformaciones se deben medir sobre un tramo central con una longitud igual a cuatro veces la menor dimensión de la sección de la probeta. Se medirán con una precisión del 1% o para deformaciones inferiores a 2 mm con una precisión de 0,02 mm.

El módulo de elasticidad en compresión,  $E_{c,0}$ , se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Siendo;

$F_2 - F_1$  Incremento de carga en la tramo recto de la curva de carga-deformación en N

$w_2 - w_1$  Incremento de deformación en mm correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

A Área de la sección transversal, en mm<sup>2</sup>.

$l_1$  Longitud base de medida, utilizada para la determinación del módulo de elasticidad, en mm.

Finalmente, para la determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra se debe continuar el ensayo anterior hasta la rotura de la probeta.

La carga se debe aplicar con un desplazamiento constante de la cabeza de carga, de forma que se alcance la rotura de la pieza en  $(300 \pm 120)$  s. Se debe registrar el tiempo de ensayo hasta la rotura de cada probeta, así como el valor medio. Se debe informar sobre aquellas probetas que hayan diferido en más de 120 s respecto al objetivo de 300 s.

La resistencia a compresión se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{\max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo.

A Área de la sección transversal, en milímetros cuadrados.

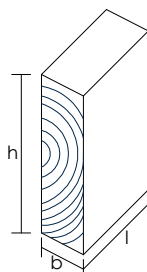
Debe anotarse, la forma de rotura y las características de crecimiento en la sección de rotura de cada probeta.

Tanto el módulo de elasticidad como la resistencia en compresión paralela a la fibra se deben calcular con una precisión del 1%.

### Determinación de la resistencia a la tracción y a la compresión perpendicular a la fibra

La elaboración de las probetas debe permitir la aplicación de las cargas sobre éstas, teniendo las dimensiones especificadas a continuación y una tolerancia del 1%:

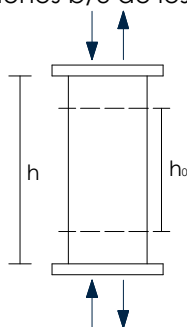
Tracción:       $b = 45 \text{ mm}$        $h = 180 \text{ mm}$        $l = 70 \text{ mm}$   
Compresión:    $b = 45 \text{ mm}$        $h = 90 \text{ mm}$        $l = 70 \text{ mm}$



**Figura IV.58.** Probeta de madera aserrada. (UNE EN 408:2011)

Las superficies sometidas a carga deben quedar planas, paralelas entre sí, y perpendiculares al eje de la probeta.

Para la realización del ensayo la probeta se coloca verticalmente entre los planos de la máquina de ensayo y se somete a las cargas de compresión o tracción adecuadas. Deben aplicarse de forma centrada de forma que el eje longitudinal de la probeta coincida con el eje de la máquina de ensayo, y fijarse a ésta de forma que inicialmente no se ejerza ninguna carga sobre la probeta, salvo las relativas a su peso propio y el dispositivo de ensayo. El tramo de referencia  $h_0$  (aproximadamente  $0,6 h$ ), debe centrarse sobre la altura de la probeta y alejarse al menos  $b/3$  de los extremos cargados de la probeta.



**Figura IV.59.** Fundamento de ensayo a la tracción o la compresión perpendicular a la fibra. (UNE EN 408:2011)

La carga debe aplicarse con una velocidad constante de forma que la carga máxima se alcance en  $(300 \pm 120)$  s. Asimismo, el dispositivo de carga utilizado debe permitir la medición con una precisión del 1% de la carga aplicada a la probeta, y para fuerzas inferiores al 10% de la fuerza máxima con una precisión del 0,1% de la carga máxima.

La resistencia a compresión o tracción se calcula, en cada caso, mediante la expresión:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{bl} \quad , \quad f_{t,90} = \frac{F_{t,90,max}}{bl} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{c,90,max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo de compresión.

$F_{t,90,max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo de tracción.

$b, l$  Dimensiones de la probeta en mm.

Tanto la resistencia a compresión como a tracción deben calcularse con una precisión del 1%.

### Determinación del módulo de elasticidad a tracción o compresión perpendicular a las fibras

Las probetas de ensayo y el procedimiento operatorio coinciden con el apartado anterior.

Se deben utilizar 2 extensómetros y colocarlos de forma que se minimicen los efectos de la distorsión. Los extensómetros deben medir los desplazamientos con una precisión del 1%. La deformación en la dirección de aplicación de la fuerza, tendrá por referencia el centro de la sección cargada, y se calculará partiendo de las mediciones sobre caras opuestas de la probeta.

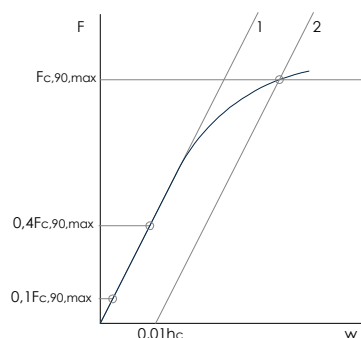
El módulo de elasticidad en compresión perpendicular a la fibra se calcula mediante la expresión:

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})bl} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{40} - F_{10}$  Incremento de carga en el tramo recto de la curva de carga-deformación en N.  $F_{10}$  y  $F_{40}$ , deben ser respectivamente iguales al 10% y al 40% de  $F_{c,90,max}$ .

$w_{40} - w_{10}$  Incremento de deformación en mm correspondiente a  $F_{40} - F_{10}$ .



**Figura IV.60.** Gráfico de carga/deformación (compresión). (UNE EN 408:2011)

La determinación de  $F_{c,90,max}$  se puede realizar según el procedimiento iterativo siguiente: Se estima un valor para la carga de  $F_{c,90,max}$ . Utilizando los resultados del ensayo, se traza la curva carga-deformación con la forma representada en la figura. Se calcula  $0,1 F_{c,90,max}$  y  $0,4 F_{c,90,max}$ , y se determina donde interceptan a la curva de carga-deformación estos dos puntos. Se traza la recta 1 que pasa por estos dos puntos. Paralelamente a la recta 1, se traza la recta 2, cuya abcisa en el origen es  $F=0$ , y a una distancia de este punto igual a  $0,01 h_{0c}$ . La ordenada del punto de intersección de la recta 2 con la curva de carga-deformación, es  $F_{c,90,max}$ . Si el valor de  $F_{c,90,max}$  se encuentra en el intervalo del 5% de  $F_{c,90,max,est}$ , este valor puede utilizarse para determinar la resistencia a la compresión. En caso contrario, se repite el procedimiento, hasta un valor de  $F_{c,90,max}$ , en dicho intervalo.

El módulo de elasticidad en tracción perpendicular a la fibra se calcula según la expresión:

$$E_{t,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})bl} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{40} - F_{10}$  Incremento de carga en la tramo recto de la curva de carga-deformación en N.  $F_{10}$  y  $F_{40}$ , deben ser respectivamente iguales al 10% y al 40% de  $F_{t,90,max}$ .

$w_{40} - w_{10}$  Incremento de deformación en mm (milímetros) correspondiente a  $F_{40} - F_{10}$ .

Tanto el módulo de elasticidad en compresión como en tracción se deben calcular con una precisión del 1%.



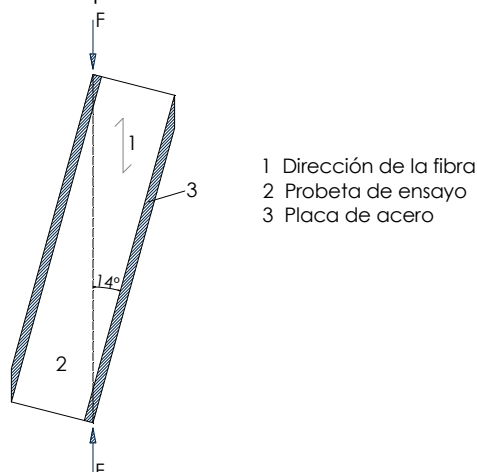
Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante paralelo a la fibra

Las probetas de ensayo deben tener las dimensiones siguientes:

Longitud  $300 \pm 2$  mm, menor dimensión transversal (b)  $32 \pm 1$  mm y canto  $55 \pm 1$  mm.

Estas probetas deben encolarse a unas placas de acero de  $(10 \pm 1)$  mm biseladas.

Para el ensayo la probeta debe alinearse de forma que se mantenga un contacto permanente entre los puntos de aplicación de las cargas F. El ángulo entre la dirección de la carga y el eje longitudinal de la probeta será de  $14^\circ$ .



**Figura IV.61.** Procedimiento de carga para determinar la resistencia a esfuerzo cortante paralelo a la fibra. (UNE EN 408:2011)

El dispositivo de carga utilizado debe permitir la medición con una precisión del 1% de la carga aplicada a la probeta, y para cargas inferiores al 10% de la carga máxima con una precisión del 0,1% de la carga máxima.

La rotura debe producirse con una velocidad de desplazamiento constante de la cabeza de carga, y regulada de forma que la fuerza  $F_{\max}$  se alcance en  $(300 \pm 120)$  s.

Se deben registrar los resultados de las probetas individuales que difieran en más de 120 s del valor objetivo de 300 s. Los tiempos de rotura deben registrarse, y su valor medio figurar en el informe de ensayo.

Finalmente, la resistencia al esfuerzo cortante  $f_v$ , se debe calcular según la siguiente expresión:

$$f_v = \frac{F_{\max} \cos 14}{lb} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{\max}$  Carga máxima del ensayo en N.  
 $l$  Longitud libre entre las mordazas en mm.  
 $b$  Menor dimensión transversal (base) en mm.

La precisión debe ser del 1%.

#### **IV.2.2.2. La norma UNE EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad**

La edición de la norma de 2010 anula y sustituye a la edición de 2004.

En esta norma se establece que el método para la determinación de los valores característicos con ensayos sobre probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos, se permite solamente para las frondosas.

Asimismo, cuando se utilizan métodos para la obtención de valores característicos a través de un número de resultados de ensayo con probetas de tamaño real inferior al ideal se deben utilizar factores de reducción para tener en cuenta el menor nivel de confianza.

Así, se establece un método para la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad para poblaciones definidas, clasificadas por procedimientos visuales y/o mecánicos. Se incluye asimismo un método para la verificación de la resistencia de una muestra de madera por comparación con un valor establecido.

Los valores determinados de acuerdo con esta norma de las propiedades mecánicas y la densidad, pueden utilizarse para asignar una pareja calidad/especie a una clase resistente según la Norma EN 338.

##### Propiedades mecánicas determinadas con probetas en dimensiones reales de utilización

- Muestreo

Según la norma UNE 384:2010, para determinar las propiedades mecánicas de una madera las muestras para ensayos deben ser representativas de una población y provenir cada muestra de una sola procedencia. Asimismo el número mínimo de probetas dentro de una muestra deben ser 40 y su tamaño de sección debe ser el mismo dentro de una muestra.

- Ensayos

Con respecto a los ensayos deben realizarse conforme se han descrito en apartados anteriores siguiendo las especificaciones de la Norma EN 408:2011. Debe seleccionarse una zona crítica en cada pieza de madera, que será el entorno en el que se prevea que puede originarse el fallo, basándose en un examen visual u otro tipo de información, como por ejemplo los resultados de medida en clasificación mecánica. La localización de la zona crítica debe ser tal que pueda ser sometida a ensayo, es decir, no debe estar situada fuera de la zona comprendida entre los puntos de carga en el ensayo de flexión o en la proximidad de las mordazas en los ensayos de tracción.

Para los ensayos de resistencia a flexión o módulo de elasticidad el borde sometido a tracción se debe elegir al azar.

- Análisis de datos

##### *Determinación del 5º percentil de la muestra*

Para cada muestra, se debe obtener el valor del 5º percentil,  $f_{05}$ , mediante la ecuación  $f_{05} = f_r$  donde  $f_r$  se determina clasificando todos los resultados de ensayo de una muestra en orden creciente. El 5º percentil es el valor por debajo del cual se encuentra el 5% de los resultados. Si este valor no corresponde con un resultado de ensayo real, se requiere la interpolación entre dos resultados de ensayos adyacentes.

##### *Determinación del valor medio del módulo de elasticidad de la muestra*

El valor medio del módulo de elasticidad  $\bar{E}$  de la muestra se debe calcular mediante la siguiente ecuación, que incluye una corrección respecto al módulo de elasticidad en flexión pura:

$$\bar{E} = (\sum E_i/n) \cdot 1,3-2690 \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$E_i$  i-esimo valor del módulo de elasticidad desde 1 hasta n, en N/mm<sup>2</sup>.

#### *Condiciones de referencia*

**Contenido de humedad.** El contenido de humedad de referencia debe ser el correspondiente a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%. Esto equivale para una humedad en la madera del 12%

**Resistencia a la flexión.** Las condiciones de referencia se corresponden con un canto de 150 mm y a unas proporciones de ensayo normalizadas, con aplicación de la carga a tercios de la luz, con una luz total igual a 18 veces el canto de la probeta.

**Resistencia a tracción.** Las condiciones de referencia se corresponden con una anchura de 150 mm.

#### *Factores de corrección*

**Generalidades.** El 5º percentil o el valor medio de cada muestra deben ser corregidos respecto a las condiciones de referencia normalizadas.

**Contenido de humedad.** En el caso de muestras ensayadas en condiciones distintas a las de referencia, pero con un contenido de humedad medio dentro del intervalo comprendido entre el 10 y el 18%, la corrección para el valor del 5º percentil o para la media del 12% de contenido de humedad debe realizarse como se especifica a continuación:

- a) Resistencia a flexión y a tracción: no es necesaria corrección.
- b) Resistencia a compresión paralela a la fibra: corrección del 3% para cada variación del 1% del contenido de humedad.
- c) Módulo de elasticidad: corrección del 2% por cada variación del 1% de humedad.

Para la resistencia a compresión paralela a la fibra y el módulo de elasticidad las correcciones deben realizarse de forma que las propiedades aumenten si los datos se corrigen para un contenido de humedad mayor y viceversa.

**Dimensiones de la pieza y longitud de ensayo.** El 5º percentil de la resistencia a flexión y a tracción debe corregirse a un canto de referencia o a una anchura de 150 mm, dividiendo por:

$$k_h = \left( \frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

Cuando el dispositivo de ensayo en flexión no sea conforme a la UNE EN 408:2011 ( $l=18h$  y distancia entre puntos de carga  $a_f=6h$ ) el 5º percentil de la resistencia a flexión deberá corregirse dividiendo por:

$$k_l = \left( \frac{l_{es}}{l_{et}} \right)^{0,2}$$

siendo;

$l_{es}$  y  $l_{et}$  se calcula:  $l_{es}$  o  $l_{et} = l + 5a_f$

siendo;

$a_f$  y  $l$  tienen respectivamente los valores establecidos para el procedimiento de ensayo normalizado y para el ensayo.

- Propiedades de resistencia

El valor característico  $f_k$  se debe calcular mediante la ecuación:

$$f_k = f_{05m} k_s k_v \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$f_{05m}$  Media en  $\text{N/mm}^2$ , de los valores corregidos del 5º percentil de cada muestra, ponderadas según el número de elementos de cada muestra. Si la media es superior a 1,2 veces el menor de los valores corregidos de  $f_{05}$  entonces debe ser necesario redefinir la población de referencia para eliminar el valor menor o bien tomar  $f_{05m}$  igual a 1,2 el menor de los valores de  $f_{05}$ .

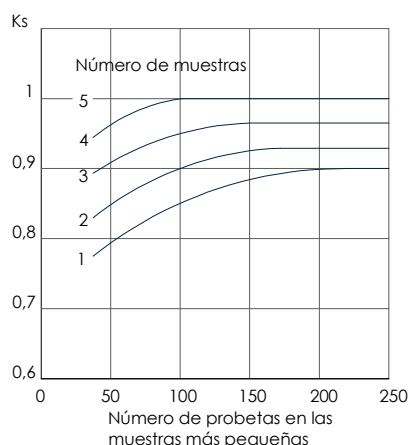
$k_s$  Factor de corrección en función del número y tamaño de las muestras y se determina utilizando el gráfico de la Figura IV.62.

$k_v$  Factor que tiene en cuenta la menor variabilidad de los valores de  $f_{05}$  entre las muestras en el caso de clasificación mecánica respecto a la clasificación visual;

$k_v = 1$  Para la clasificación mecánica cuando  $f_{mk}$  es mayor que  $30 \text{ N/mm}^2$  y para todas las clasificaciones visuales;

$k_v = 1,2$  Para la clasificación mecánica cuando  $f_{mk}$  es menor o igual a  $30 \text{ N/mm}^2$ .

Los factores  $K_s$  y  $k_v$  no deben utilizarse para calcular los valores característicos de resistencias a esfuerzo cortante, a tracción perpendicular a la fibra y compresión perpendicular a la fibra.



**Figura IV.62.** Influencia del número de muestras y de su tamaño sobre el coeficiente  $K_s$ . (UNE 384:2010)

- Módulo de elasticidad

Una vez corregido el valor de  $E$  de cada muestra a las condiciones de referencia, el valor característico de  $E_{0,medio}$  debe calcularse mediante la ecuación:

$$E_{0,medio} = \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j}$$

siendo;

$n_j$  Número de probetas de la muestra  $j$ .

$\bar{E}_j$  Valor medio del módulo de elasticidad de la muestra  $j$  (en  $\text{N/mm}^2$ ).

## Densidad

Para la medida de la densidad característica debe calcularse partiendo de las medidas de densidad de las muestras seleccionadas.

Las mediciones deben realizarse de acuerdo con el apartado 6.1 de la Norma ISO 3131:1975. Cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada 1% de variación del contenido de humedad. Esta forma de proceder se basa en la hipótesis de que la masa y el volumen se miden al contenido de humedad de ensayo. El 5º percentil de la densidad para la muestra  $\rho_{05}$  debe calcularse con la siguiente ecuación:

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1,65s) \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

donde;

$\bar{\rho}$  y  $s$  Media y desviación típica respectivamente de las densidades de todas las probetas de la muestra en Kg/m<sup>3</sup>

Cuando solamente una parte de las probetas se ensayan hasta rotura, se permite determinar la densidad de cada una de las probetas partiendo de la masa y el volumen de la probeta completa y corrigiendo a la densidad del prisma de pequeñas dimensiones y libre de defectos dado en la Norma ISO 3131:1975, dividiendo por 1,05. Esta operación no incluye ningún ajuste relativo al contenido de humedad, que podría ser necesario.

La densidad característica  $\rho_k$  debe calcularse mediante la ecuación:

$$\rho_k = \frac{\sum \rho_{05,j} n_j}{\sum n_j}$$

donde;

$n_j$  Número de probetas de la muestra  $j$ ;

$\rho_{05,j}$  Valor del 5º percentil de la densidad para la muestra  $j$ .

#### Métodos alternativos para la determinación de las propiedades mecánicas

*Resistencia a flexión y módulo de elasticidad* a partir de probetas pequeñas libres de defectos. Este método se admite solo para frondosas.

*Resistencia a tracción, compresión y esfuerzo cortante en dirección paralela a la fibra.* Los valores característicos de resistencia a tracción paralela a la fibra  $f_{t,0,k}$  resistencia a compresión paralela a la fibra  $f_{c,0,k}$  y resistencia a esfuerzo cortante  $f_{v,k}$ , para especies de coníferas, se deben calcular según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} f_{t,0,k} &= 0,6 f_{m,k} \\ f_{c,0,k} &= 5 (f_{m,k})^{0,45} \end{aligned}$$

$$f_{v,k} = \min. \begin{cases} 3,8 \\ 0,2 (f_{m,k})^{0,8} \end{cases}$$

*Resistencia a tracción en dirección perpendicular a la fibra.* El valor característico de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra  $f_{t,90,k}$  se debe calcular de acuerdo con la ecuación:

$$f_{t,90,k} = \min. \begin{cases} 0,6 \\ 0,0015p_{,k} \end{cases}$$

*Resistencia a compresión en dirección perpendicular a la fibra.* El valor característico de la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra  $f_{c,90,k}$  se debe calcular de acuerdo con la ecuación:

$$\begin{aligned} f_{c,90,k} &= 0,007p_{,k} && \text{para las especies coníferas} \\ f_{c,90,k} &= 0,0015p_{,k} && \text{para las especies frondosas} \end{aligned}$$

*Módulo de elasticidad característico paralelo a la fibra (5º percentil).* El módulo de elasticidad característico paralelo a la fibra  $E_{0,05}$  se debe calcular de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_{0,05} &= 0,67 E_{0,medio} && \text{para las especies coníferas} \\ E_{0,05} &= 0,84 E_{0,medio} && \text{para las especies frondosas} \end{aligned}$$

*Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra.* El valor medio del módulo de elasticidad perpendicular a la fibra  $E_{90,medio}$  se debe calcular de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_{90,medio} &= E_{0,medio}/30 && \text{para las especies coníferas} \\ E_{90,medio} &= E_{0,medio}/15 && \text{para las especies frondosas} \end{aligned}$$

*Módulo de elasticidad transversal.* El valor medio del módulo de elasticidad transversal  $G_{medio}$  se debe calcular mediante la ecuación:  $G_{medio} = E_{0,medio}/16$

#### **IV.2.2.3. La norma UNE EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes**

La norma UNE EN 338:2010 anula a la norma de UNE EN 338 de 2003.

En ella se establece un sistema de clases resistentes de uso general en el marco de las normas de cálculo estructural. Este sistema de clases resistentes presenta las siguientes ventajas:

- Posibilidad de incorporar al sistema especies/calidades complementarias en cualquier momento, sin afectar a las especificaciones ya existentes de madera estructural.
- No es necesario que el calculista conozca en el momento que efectúa los cálculos, el coste y la disponibilidad de las diferentes especies y calidades posibles. Le es suficiente calcular con los valores característicos resistentes de una clase concreta y luego especificar dicha clase. Puede entonces recurrir al conjunto de la oferta y escoger la especie/calidad más económica de la oferta. Se debe tener en cuenta que, cuando una especie en particular no se puede utilizar (por ejemplo por motivos de durabilidad) para un proyecto, esto debe reflejarse claramente en las especificaciones.
- Posibilidad para los almacenistas (suministradores) de ofrecer productos que satisfagan más ventajosamente las especificaciones de lo que sería posible si las especies y calidades estuvieran especificadas.

Para cada clase resistente se indican los valores característicos de resistencia y rigidez y los valores de densidad, así como los criterios de clasificación de las poblaciones de madera (es decir las combinaciones de especies, procedencias y calidades).

Esta norma es de aplicación para todas las especies frondosas o resinosas de utilización estructural.

Las ecuaciones empleadas para el cálculo de los valores característicos de las propiedades relacionadas en la Tabla 1, excepto para las propiedades de resistencia a flexión, valor medio del módulo de elasticidad en flexión y densidad, son las referidas en la norma UNE EN 384:2010, calculadas a partir de los valores de resistencia, módulo de elasticidad y densidad, datos obtenidos de los ensayos.

#### **IV.2.2.4. La norma UNE EN 1912:2010. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales de especies**

La edición de la norma de 2010 anula y sustituye a la edición de 2005 + A3:2009.

En esta norma se establece una serie de calidades visuales de resistencia, de especies y de procedencias de la madera y especifica las clases resistentes, definidas en la norma UNE EN 338, a las que se pueden asignar.

En esta norma se muestra el carácter globalizador del actual mercado reflejado por la intercomparación de las calidades visuales de las especies según su procedencia.

Para el caso de las especies botánicas españolas esta norma asigna para cada clase resistente la siguiente relación de especies:

C30: Calidad visual ME-1 de la especie Pino Laricio.

C27: Calidad visual ME-1 de la especie Pino Silvestre.

C24: Calidad visual ME-1 de las especies Pino Radiata y Pinaster.

C22: Calidad visual MEG de las especies Pino Laricio y Silvestre.

C18: Calidad visual ME-2 de las especies Pino Radiata, Pinaster, Laricio y Silvestre.

Además de estas calidades visuales de las especies españolas se establecen correspondencias con calidades visuales de especies de otros países europeos.

**Tabla IV.1.** Clases resistentes. Valores característicos.

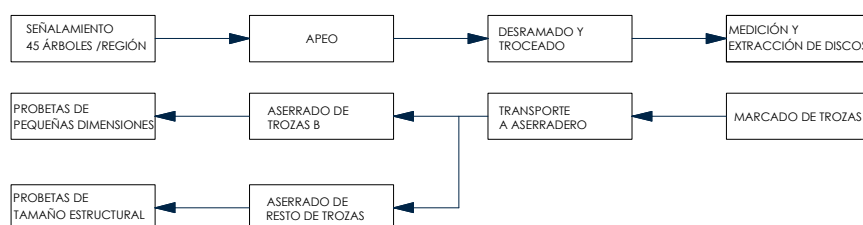
	Coníferas y chopo														Frondosas							
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70				
	Propiedades de resistencia (en N/mm²)																					
Flexión	f <sub>m,k</sub>	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70			
Tracción paralela a la fibra	f <sub>t0,k</sub>	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42			
Tracción perpendicular a la fibra	f <sub>c,90,k</sub>	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6			
Compresión paralela a la fibra	f <sub>c0,k</sub>	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34			
Compresión perpendicular a la fibra	f <sub>c90,k</sub>	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5			
Cortante	f <sub>v,k</sub>	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0			
Propiedades de rigidez (en N/mm²)																						
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra	E <sub>0,medio</sub>	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20			
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5ºpercentil)	E <sub>0,05</sub>	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8			
Módulo de elasticidad medio perpendicular o a la fibra	E <sub>90,medio</sub>	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33			
Módulo medio de cortante	G <sub>medio</sub>	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25			
Densidad (en Kg/m³)																						
Densidad	ρ <sub>k</sub>	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900			
Densidad media	ρ <sub>medio</sub>	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080			



Siguiendo las metodologías de las normas descritas, desde el INIA se han llevado a cabo diversos trabajos de caracterización de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

En 2001, **Fernández-Golfín et al.** realizan un estudio sobre la caracterización y las propiedades de la madera aserrada de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold *Salzmannii*).

Para ello, clasifican y ensayan 1012 vigas de 2, 3 y 4 metros, extraídas de los montes de Cuenca, y 1874 vigas, procedentes del resto del estado, especialmente de Cazorla y sus proximidades. Dentro de cada zona se evita concentrar la selección de los árboles en el mismo lugar, así como la influencia de bordes, corrientes de agua y cualquier otra circunstancia que pudiera afectar a los resultados. Para poder efectuar mejor la comparación entre árboles se seleccionan árboles de diámetro con corteza próximo a 40 cm. La elección de este diámetro está relacionada con su representatividad del turno óptimo (100-120 años), en función de las tablas de crecimiento y producción (Gómez Loranca, 1996). El proceso seguido con el material queda recogido en la Figura IV.63.



**Figura IV.63.** Metodología general del trabajo por procedencias. (Fernández-Golfín et al., 2001).

La metodología seguida, adaptándose a la distribución geográfica del material, es siempre la misma:

- Vigas a escala real (piezas de 2, 3 y 4 metros). Se determinan las propiedades mecánicas, elásticas y cualitativas del material. Los valores de resistencia y elasticidad obtenidos se introducen en las normas de calidad.

- Probetas libres de defectos. Se determinan las propiedades físico-mecánicas, analizándose cómo varían dentro del árbol, entre árboles y entre zonas de procedencia.

Adicionalmente, se estudia el comportamiento durante el secado y la forma óptima de llevarlo a cabo, su durabilidad natural y la mejor manera de incrementarla mediante tratamientos preventivos, la aptitud al desarrollo, etc.

## Resultados

Los ensayos realizados permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. La madera de pino laricio es más pesada (mayor densidad), más homogénea (coeficiente de anisotropía menor) y más resistente y rígida que las restantes coníferas españolas (un 20% más resistente y rígida que la de pino silvestre y un 30% más que la del pino pinaster).
2. Su contracción volumétrica total desde verde hasta estado anhidro es ligeramente superior al de las otras coníferas.
3. Su contenido en resina es el doble que el calculado para el pino silvestre, aunque todavía muy inferior al del pino gallego. Este hecho aconseja el secado artificial en cámara, con ciclos de secado suaves ( $T < 60^{\circ}\text{C}$ ).

4. Existe un mayor porcentaje de rechazo por deformaciones excesivas (11%) que en pino silvestre (9%) pero inferior al pino radiata (15%). Debe destacarse su propensión a la deformación por alabeo, en comparación con el pino silvestre, lo que lleva a recomendar un exquisito cuidado en las tareas de apilado y enrastrelado del material, y a extremar las labores de seguimiento del proceso de secado.
5. Tiene tendencia al azulado mientras está verde, por lo que debe adoptarse medidas preventivas: rápido acarreo y aserrado de las trozas, inmediato tratamiento de la madera con productos eficaces y a concentraciones algo más elevadas que en pino silvestre y secado en condiciones de alta ventilación.

Por otro lado, la evaluación visual de su calidad estructural según la norma UNE 56544 arroja resultados peores que en otros pinos. Su clasificación aporta menores porcentajes de madera clasificada como primera y mayores de madera rechazada. Sin embargo, la clasificación por máquina aporta resultados totalmente opuestos. A igualdad de calidad visual, los valores característicos y medios de resistencia de esta madera son siempre superiores a los del resto de pinos españoles.

Con todos estos resultados se deduce que la madera de pino laricio es una madera especialmente apta para el trabajo mecánico y debe ser la especie de preferencia cuando se necesita una madera altamente resistente.

En el año 2002, **Hermoso et al.** llevan a cabo un estudio de caracterización mecánica de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) adaptándose a las modificaciones de la normativa UNE EN 384. Este estudio completa a un estudio iniciado por Fernández-Golfín en 1997 aumentando el número de procedencias de las muestras.

Se ensayan un total de 1661 piezas de diversa procedencia. El tamaño de las piezas responde a dimensiones estructurales variando entre 40 y 70 mm de anchura, 100 y 200 mm de altura y longitudes de 2, 3 y 4 m.

Para elaborar el estudio se sigue un proceso sistemático de caracterización de cada pieza basado en una clasificación visual según UNE 56544, la determinación de la tensión de rotura en flexión y los valores de densidad y medida de la anchura de los anillos de crecimiento. A partir de esta información se realiza un cálculo de los valores característico y medio según la norma UNE EN 384. Finalmente, se asigna un valor de clase resistente en función de la calidad visual según las disposiciones de la norma UNE EN 338.

### Resultados

El análisis de los resultados obtenidos del estudio pone de manifiesto:

1. Las muestras que presentan menores rendimientos en la estimación de calidades visuales son las de pequeña y gran sección. En el caso de las muestras de pequeña escuadría se debe a que son obtenidas a partir de puntas y las muestras grandes porque incluyen la médula. En ambos casos, se clasifican según la normativa de clasificación visual como ME-2. Las secciones de 150x50 mm ofrecen un mayor rendimiento en la estimación de calidades.
2. En cuanto a los rendimientos visuales en función de la región de procedencia, no se observan diferencias significativas entre las distintas zonas.
3. Las propiedades clasificadoras (módulo de elasticidad, resistencia a flexión y densidad) ofrecen mejores valores en calidades visuales altas con independencia de la procedencia. En cuanto a la comparación de valores entre las distintas regiones, cada una destaca por su superioridad en un determinado valor no existiendo ninguna que presente valores superiores en todas las propiedades.

4. El estudio de la relación entre las variables clasificadoras pone de manifiesto que el módulo de elasticidad local es un predictor de la tensión de rotura ( $R^2=50-60\%$ ). No obstante, esta variable presenta una gran dificultad de medida. Así, se proponen las variables módulo de elasticidad global y global de canto ( $E_g$ ,  $E_{gt}$ ) para la predicción de la resistencia a la rotura.
5. La introducción de muestras de nueva procedencia produce una reducción en la determinación de la clase resistente en función de la calidad visual (en el caso de la madera de calidad ME-1 pasa de clasificarse C30 a C27) siendo estos datos más significativos. En cuanto a la calidad ME-2 se le asigna una clase resistente C18.
6. La comparación del pino silvestre con otras especies refleja que es un 20% menos resistente y rígido que el pino laricio y un 8% más que el pino pinaster. Los valores del módulo de elasticidad local,  $E_l$ , y la resistencia a flexión,  $f_m$ , son similares para el pino silvestre y pinaster, siendo la densidad del pino pinaster superior.
7. En cuanto a la comparación del pino silvestre español con otras procedencias europeas, este se ve superado en resistencia por el nórdico, francés y alemán.

### Notas del capítulo:

#### Normativa

UNE EN 338:2010. "Madera estructural. Clases resistentes".

UNE EN 408:2011. "Estructuras de Madera. Madera aserrada y laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

UNE EN 384:2010. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad".

UNE EN 1912:2010. "Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies".

#### Artículos

Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Baonza, M.V., Gutierrez, A., Hermoso, E., Conde, M., Van den Eynde, V. "Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de pino laricio (*Pinus Nigra Arnold Salzmannii*)". *Investigaciones Agrarias: Sist. Recur. For.* Vol. 10, Nº 2. (2001). pp. 311-331.

Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R. "Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica". *Investigaciones Agrarias: Sist. Recur. For.* Vol. 11, Nº 2. (2002). pp. 425-440.

## **IV.3. SOLUCIONES DE CONSOLIDACIÓN O REFUERZO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LOS FORJADOS DE MADERA: VIGAS Y VIGUETAS**

---

IV.3.1. ACTUACIONES SOBRE LOS APOYOS DE LAS VIGAS

IV.3.2. ACTUACIONES SOBRE PIEZAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

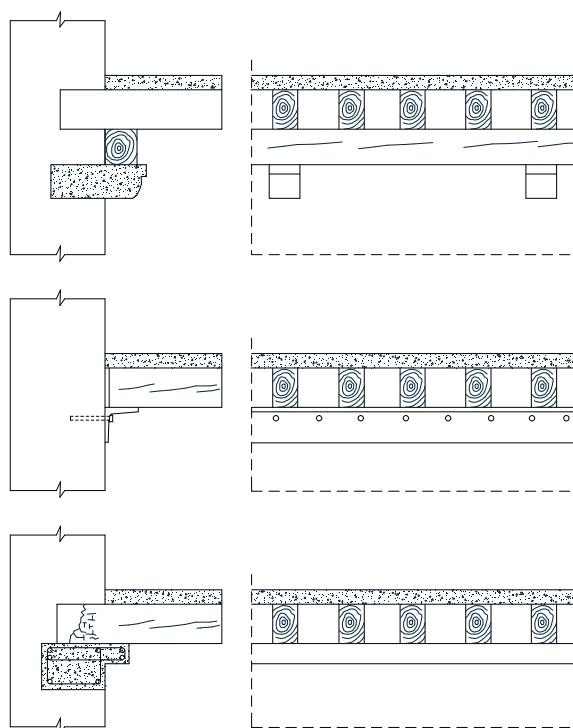


### IV.3.1. ACTUACIONES SOBRE LOS APOYOS DE LAS VIGAS

Los empotramientos de las vigas o pares en los muros de fábrica suelen ser zonas con riesgo de pudrición de la madera. La falta de ventilación de la madera empotrada propicia su deterioro, más aún cuando existe algún foco de humedad. No obstante, en la mayoría de los casos nos encontramos como el resto de la pieza está en buenas condiciones y puede ser reutilizado. Para ello es necesario recuperar la estabilidad del apoyo. A continuación se detallan las soluciones existentes en el mercado actual.

#### IV.3.1.1. Apeo sobre una línea adosada al muro

Es una solución frecuente en estructuras antiguas que han sufrido daños de pudrición en las cabezas de las vigas. Consiste en disponer una nueva línea adosada al muro mediante una carrera, generalmente de madera, que descansa en ménsulas de piedra que se empotran en el muro o sobre pies derechos adosados al muro. Los inconvenientes de esta solución es que producen excentricidad de cargas respecto al eje del muro, lo que provoca una flexión que favorece su tendencia al desplome (Figura IV.64).

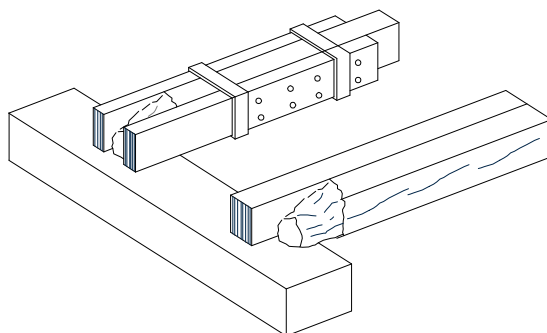


**Figura IV.64:** Apeo de las cabezas de las vigas con una línea adosada al muro (carrera de madera, perfil metálico y ménsula de hormigón armado). ("Intervención en estructuras de madera". ALTIM)

#### IV.3.1.2. Refuerzo mediante aporte de madera

La consolidación y el refuerzo adosando piezas de madera tiene un comportamiento similar al de los aportes metálicos. La solución más inmediata es la de adosar dos piezas de madera uniéndolas mediante pernos, clavos o bridas metálicas. También existe la posibilidad de incorporar una nueva vigueta a la ya existente, sin eliminar la pieza deteriorada (Figura IV.65).

Uno de los grandes inconvenientes de esta solución es el impacto visual que producen en la estructura, considerándose soluciones de reparación temporales.

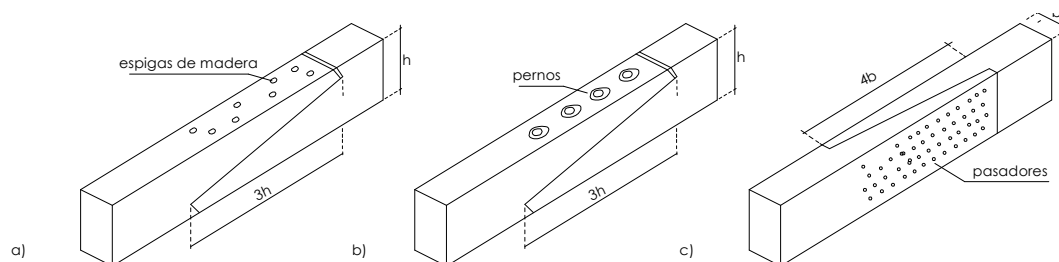


**Figura IV.65:** Refuerzo del apoyo de la viga mediante encepado con dos piezas o simple adosado de otra viga.

En 1993, **Mettem et al.** presentan un trabajo de investigación sobre las posibilidades de la reparación de vigas mediante aporte de madera. La conexión entre la madera nueva y la antigua se plantea mediante elementos de fijación mecánicos (pernos, pasadores,...).

La eficacia de una unión de este tipo se puede definir como la relación entre la capacidad de carga de la pieza reparada y la capacidad de carga de la pieza original. Se habla de la eficacia en flexión cuando se refiere a la resistencia a esta solicitación, o de la eficacia en rigidez, cuando se trata de comparar la deformabilidad.

Las soluciones analizadas consisten principalmente en empalmes de las piezas mediante un corte oblicuo (Figura IV.66). Las piezas tenían secciones de 150 x 250 mm. La primera solución es de corte oblicuo en la cara de la pieza y se refuerza con espigas de madera de roble (Figura IV.66.a). La pendiente del corte es tal que la longitud,  $l$ , de la unión es 3 veces el canto,  $h$ , de la viga. La eficacia a flexión de esta solución es, para madera de conífera, 0,20 y 0,24 en rigidez. Añadiendo cuatro pernos perpendiculares al plano inclinado (Figura IV.66.b) la solución mejora alcanzando una eficacia en flexión de 0,35 y una eficacia en la rigidez de 0,27. Finalmente, la mayor eficacia se consigue realizando un empalme según un plano oblicuo en el canto de la pieza (Figura IV.66.c). En este caso la pendiente del plano de corte cumple la relación longitud/anchura de la viga igual a cuatro. La unión se refuerza con pasadores metálicos de 12 mm de diámetro. La eficacia en flexión conseguida es 0,34 y 0,59 en rigidez. Debido a la baja eficacia de estas soluciones deben emplearse donde la flexión de la viga sea reducida.



**Figura IV.66:** Consolidación de vigas con madera (Mettem et. al., 1993.)

En 1997, **Landa** presenta su tesis doctoral "Comportamiento de las uniones encoladas para la reparación de elementos estructurales de madera que trabajan a flexión". En este trabajo consigue aumentar la eficacia en las uniones con aporte de madera mediante el encolado con resinas de resorcina. En este estudio analiza tres tipos de soluciones: la unión por empalme de caja y espiga recta, la unión por empalme oblicuo en la cara de la viga y la unión por empalme en un plano vertical.

La unión por empalme de caja y espiga recta (Figura IV.67.a), puede realizarse con una o varias espigas. Su eficacia es del orden de 0,50 a 0,60, manteniendo la relación entre la longitud,  $l$ , y el ancho de la viga,  $b$ , mayor o igual a 8 ( $l/b=8$ ). Si el empalme se realiza con varias espigas es posible reducir la longitud de las mismas.

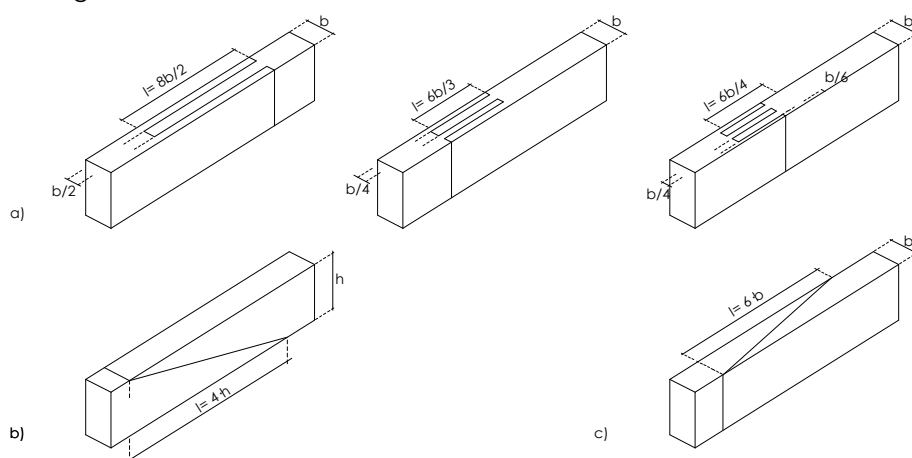


La unión por empalme oblicuo en la cara de la viga (Figura IV.67.b), alcanza una eficacia en flexión de 0,85 y 0,97 en rigidez, cuando la pendiente del plano oblicuo es de 1/4 y se refuerza la zona traccionada con clavijas de madera dura. La eficacia de las clavijas es fundamental ya que sin ellas la eficacia en flexión baja a 0,27.

La unión por empalme oblicuo en un plano vertical (Figura IV.67.c), es la solución más eficaz. Con una pendiente de 1/6, se alcanza una eficacia en resistencia y rigidez a flexión del orden de 1,00.

El uso de resinas de resorcina requiere una serie de condiciones: control de la temperatura del local, el contenido de humedad de la madera y la presión de encolado. La temperatura mínima es de 20°C. La humedad de la madera no debería superar el 15 o 17% y en el prensado se recomienda una presión mínima de 0,5 N/mm<sup>2</sup>.

Por último, cabe destacar el impacto estético favorable de la solución y el respeto a los materiales originales.



**Figura IV.67:** Consolidación de viga mediante madera encolada. (Landa, 1997)

Una variante de esta solución consiste en la sustitución de la cabeza de la viga degradada por listones de madera encolados a la parte sana restante. La unión a la viga original se configura como una unión a espiga.

Este tipo de intervención requiere una elevada precisión en la elaboración y por consiguiente, mano de obra especializada. A su vez, requiere fáciles condiciones de accesibilidad a la zona a intervenir.

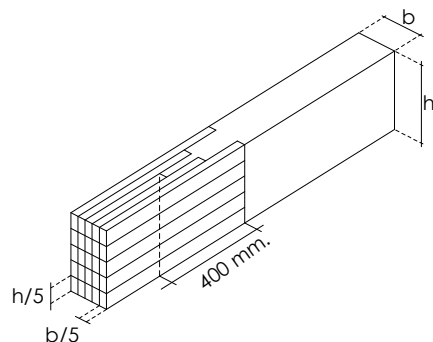
Como aspectos positivos podemos mencionar su impacto estético favorable y el respeto a los materiales originales.

Su puesta en obra consta de las siguientes fases:

1. Apeo de la viga sobre la que se va a actuar y apertura del hueco en el muro.
2. Corte de la viga a espiga y retirada de la parte degradada.
3. Preparación de una serie de listones de madera con clase de resistencia y durabilidad igual o mejor respecto a la madera original. La humedad de la madera con la cual se realiza la prótesis debe ser aproximadamente aquella esperada en las condiciones de servicio previstas (en el momento de su colocación puede superarla en un 5-6% como máximo).

4. Encolado de los listones con adhesivo tixotrópico, cuidando que no quede ninguna zona sin adhesivo o con burbujas de aire. Clavar o atornillar los listones a la parte sana durante el periodo de secado del adhesivo.

5. Transcurrido el periodo de secado del adhesivo reconstruir el muro, retirar el apeo y aplicar el acabado deseado a la superficie de la viga.



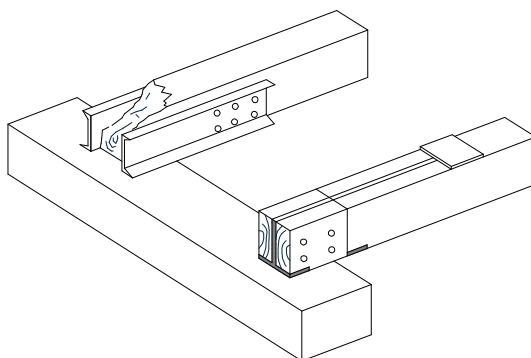
**Figura IV.68:** Consolidación de la cabeza de la viga mediante listones de madera encolados.

#### **IV.3.1.3. Refuerzo del apoyo mediante perfiles metálicos**

Esta solución se suele emplear como refuerzo de los apoyos de las vigas en reparaciones de emergencia o de escaso valor. Para ello se monta una estructura de apeo a modo de emparrillado que consta de una o dos carreras, en función de la extensión de la pudrición, en posición paralela al muro y que apoyan a su vez en vigas empotradas en el muro. El hueco entre las carreras se maciza para evitar desprendimientos del forjado.

Asimismo, es posible encontrar reparaciones puntuales de las cabezas de las vigas mediante la colocación de pletinas o perfiles en ángulo atornillados a las piezas para alargar su longitud. Su forma de trabajo es de difícil justificación por cálculo por lo que solo puede considerarse como soluciones temporales.

Como solución más elaborada podemos encontrar el uso de perfiles UPN, que solapan la madera sana en una longitud del orden de los 50 a 80 cm y se conectan mediante pernos. En la aplicación práctica esta solución resulta cara y además puede dar lugar a deformaciones excesivas para su entrada en carga. Finalmente, está la opción de embeber un herraje en la sección de la pieza para alargar su longitud. Esta solución es más eficaz que la anterior.



**Figura IV.69:** Aumento de la longitud de la viga mediante perfiles metálicos. ("Intervención en estructuras de madera". ATIM)

El principal inconveniente que presentan los refuerzos metálicos, además del impacto visual que provocan en la estructura, es la corrosión.

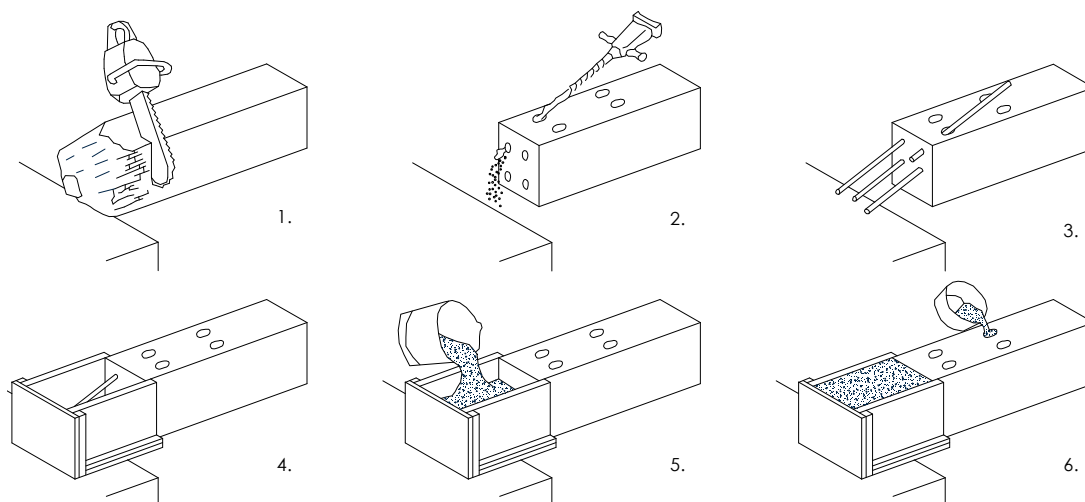
#### IV.3.1.4. Refuerzo mediante formulación epoxi

Los refuerzos mediante resinas epoxi comenzaron a utilizarse hace unos 40 años. Su principal ventaja se halla en la posibilidad que ofrece para el relleno de cavidades sin presentar problemas de retracción y en la adherencia con casi todos los materiales.

La solución más representativa de este sistema es la sustitución de la parte dañada de la cabeza de la viga por un mortero de formulación epoxi que se conecta a la madera sana a través de barras de materiales compuestos (por ejemplo resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio). Este procedimiento es objeto de la patente conocida como "Sistema Beta" (Promax, 1982).

Su ejecución sigue el siguiente proceso:

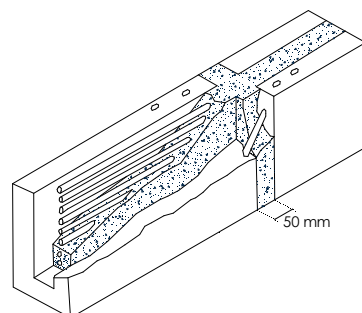
1. Apeo de la viga sobre la que se va a actuar y corte de la zona degradada de la cabeza. Se recomienda realizar un corte oblicuo para mejorar la transmisión de los esfuerzos de corte.
2. Realización de los taladros con un ángulo de 20 a 30° en la parte sana de la madera, para el alojamiento de las barras de refuerzo. Estos taladros suelen tener un diámetro de 28 mm para barras de 20 mm.
3. Instalación de las barras de refuerzo en los orificios.
4. Montaje de un encofrado que restituye la parte perdida de la madera. Este encofrado puede ser construido con tablero de partículas si es desechable, aunque a veces se emplea un encofrado de madera que queda visto, o para pintar, forrando la parte de mortero epoxi.
5. Vertido de un mortero epoxi en el encofrado. Este mortero está constituido por la resina epoxi y el endurecedor mezclado con arena y gravilla de cuarzo.
6. Relleno de las holguras que quedan entre las barras de conexión y la madera con una formulación epoxi más fluida.



**Figura IV.70:** Secuencia de operaciones en la consolidación de una cabeza de viga mediante sistema Beta (Promax, 1982).

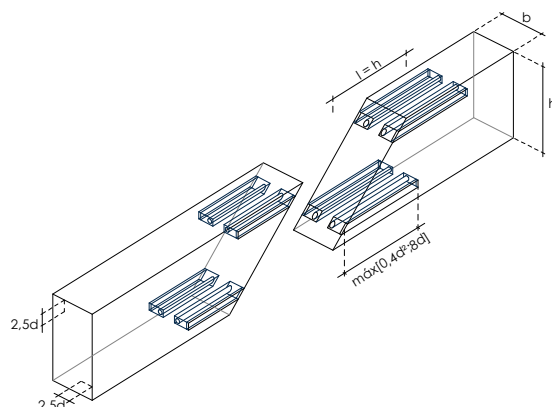
Cuando no es posible acceder por arriba se recurre a trabajar desde abajo y sobre las caras laterales. Los taladros se realizan en planos horizontales y con dirección oblicua respecto al eje de la viga.

El trabajo de **Mettem et al.**, citado con anterioridad, incluye una solución de empalme entre dos piezas mediante barras de acero conectadas con formulación epoxi. La sección de 150 x 250 mm se conecta a otra pieza de madera dejando una junta de 50 mm e introduciendo ocho barras de acero de 25 mm de diámetro insertadas en una cavidad efectuada en las piezas y con una longitud de anclaje a cada lado de 600 mm (Figura IV.71). El interior de la cavidad se rellena con formulación epoxi. En los laterales se disponen dos barras inclinadas a 45° de menor diámetro para dar estabilidad lateral. Esta solución muestra una eficacia de 0,60 en flexión y 2,38 en rigidez.



**Figura IV.71:** Empalme de dos piezas con barras de acero y formulación epoxi (Mettem et al., 1993).

Una variante de esta solución consiste en la sustitución de la parte degradada de la cabeza de la viga por una prótesis de madera unida a la parte sana de la viga por medio de cuatro barras de acero encoladas con resina epoxi. Las barras son alojadas en cajeados rectangulares que vienen cerrados mediante un listón de madera (Figura IV.72).



**Figura IV.72:** Empalme de dos piezas mediante 4 barras de acero en las esquinas encoladas con resina epoxi y listones perimetrales.

Como alternativa, las barras de refuerzo de acero pueden ser sustituidas por barras en fibra de vidrio. La durabilidad, sin embargo, depende de la compatibilidad entre el adhesivo usado y la madera.

Cabe mencionar la versatilidad de la solución, ya que permite varias situaciones de trabajo (accesibilidad lateral, desde arriba, desde abajo...). Asimismo, el impacto visual es mínimo y el coste es más contenido que en otras soluciones en las cuales se usan los mismos materiales.

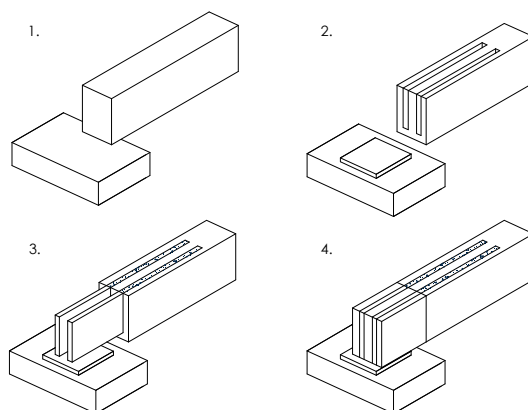
Su puesta en obra consta de las siguientes fases:

1. Apeo de la viga sobre la que se va a actuar y apertura del hueco en el muro.
2. Corte a 45° de la zona degradada de la cabeza de la viga.

3. Preparación de la prótesis de madera con clase de resistencia y durabilidad igual o mejor respecto a la madera original. La humedad de la madera con la cual se realiza la prótesis debe ser aproximadamente aquella esperada en las condiciones de servicio previstas (en el momento de su colocación puede superarla en un 5-6% como máximo).
4. Encolado de la prótesis a la viga original y fijación provisional con tablones a los laterales o gatos de carpintero para evitar movimientos durante el periodo de secado.
5. Preparación de los cajeados para el alojamiento de las barras y los listones. Las superficies deben estar exentas de polvo o fibras desgarradas.
6. Relleno de los cajeados de mortero epoxídico con ayuda de una espátula, cuidando que no quede ninguna zona con vacíos.
7. Inserción de las barras en el cajeadado y cierre con listones introducidos a presión.
8. Aplicación de presión a los listones mediante tacos de madera atornillados
9. Retirada del exceso de mortero de la superficie expuesta.
10. Transcurrido el periodo de secado del mortero, reconstruir el muro, retirar el apeo y aplicar el acabado deseado a la superficie de la viga.

Una solución menos frecuente es el empleo de placas de refuerzo para la consolidación de la cabeza. Su ejecución sigue los siguientes pasos:

1. Eliminación de la parte degradada cortando por la madera.
2. Ejecución de los cajeados para el alojamiento de las placas.
3. En estas cajas se insertan al menos dos placas de refuerzo que pueden ser de acero o de materiales compuestos (resina reforzada con fibra de vidrio). La anchura de la caja debe ser tal que se dejen, al menos, 4 mm a cada lado de la placa para rellenar.
4. Puede ser necesario colocar una placa sobre el muro para que la carga concentrada no provoque aplastamiento local en el muro. Como acabado y para protección frente al fuego se colocarán unas piezas de madera para recubrir las placas en los laterales.



**Figura IV.73:** Consolidación de la cabeza de una viga mediante placas encoladas a la madera.

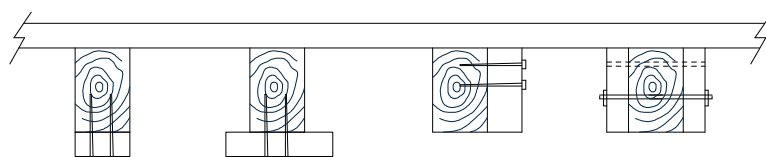
### IV.3.2. ACTUACIONES SOBRE PIEZAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

En la mayoría de los casos el problema de los forjados está relacionado con la degradación biótica de los apoyos. No obstante, en ocasiones el problema afecta a toda la longitud de la viga. Esta situación suele estar relacionada con varios aspectos:

- Sección insuficiente para soportar las cargas con una tensión o una deformación admisible. La aplicación de una normativa de acciones más exigente puede invalidar, o dejar fuera de norma, una estructura.
- Ataque biótico en el vano de la pieza.
- Roturas debidas a los defectos de la madera.

#### IV.3.2.1. Soluciones con aporte de madera

Esta solución suele emplearse cuando la capacidad resistente de los forjados no es suficiente. Como solución se añaden nuevas piezas adosadas o intercaladas a las originales (Figura IV.74). La ejecución es fácil, siempre que el apoyo de las viguetas se pueda realizar sobre otra pieza sin necesidad de hacer nuevos cajeados en el muro. Los problemas que se presentan es que las nuevas piezas son rectas mientras que las piezas originales suelen tener una deformación remanente.



**Figura IV.74:** Refuerzo de las viguetas de un forjado. ("*Intervención en estructuras de madera*". AITIM)

Otra solución que suele emplearse es la colocación de vigas que dividan la luz del forjado. Esta solución presenta una serie de inconvenientes:

- Aumento de canto en algunas zonas del forjado.
- El apoyo de las viguetas puede requerir el uso de calzos o cuñas, debido a la irregularidad de las viguetas originales.
- Necesidad de introducir apoyos intermedios para la viga parteluz. Cuando la dimensión transversal del forjado es muy grande es necesario introducir apoyos intermedios, como pilares o vigas.

En el caso de forjados continuos biapoyados, puede mejorarse su comportamiento dando continuidad en el apoyo común, mediante piezas de madera que se adosan a las originales y rigidizan el nudo. De esta manera se logra reducir la flecha del vano en un elevado porcentaje.

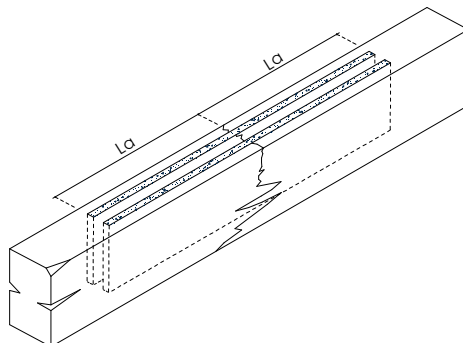
Otra solución para disminuir la longitud de una viga es la introducción de jabalcones que aportan puntos de apoyo intermedios. El encuentro de los jabalcones con la viga se realiza mediante ensamble o con la ayuda de una pieza que hace de puente de equilibrando los empujes de los jabalcones. El inconveniente que se deriva de esta solución es que los muros deben resistir un empuje horizontal, de difícil análisis.

#### IV.3.2.2. Aplicación de la tecnología de las resinas epoxi

Es frecuente encontrar forjados en los que una de sus viguetas ha sufrido una rotura debido a un defecto local. En esos casos es necesario recuperar la resistencia de dichas piezas para lo que pueden emplearse los siguientes sistemas:

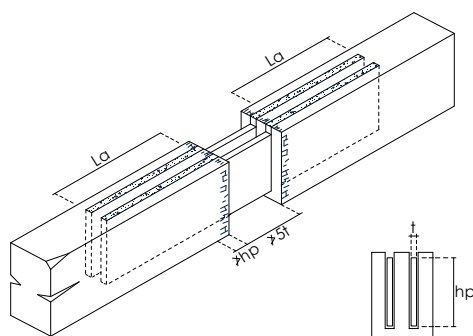
#### Placas de refuerzo internas:

Es una de las soluciones más cómodas. Para ello debe colocarse la viga en la posición original y apearla correctamente. Desde la cara superior se realiza el cajeado para introducir al menos dos placas de refuerzo con una longitud de anclaje suficiente para la transmisión del momento flector y cortante que se den en la sección. El anclaje debe hacerse sobre madera sana.



**Figura IV.75:** Consolidación con placas internas. ("Intervención en estructuras de madera". AITIM)

Cuando se presenta el caso de una reconstrucción de un vano de una pieza en la que existen daños por pudrición dejando una zona de madera perdida, el procedimiento es similar, pero el anclaje debe realizarse descontando la zona dañada. La longitud de las placas que queda en vacío no debería superar un valor igual a 5 veces el grueso de las placas. Este procedimiento es válido para empalmar restos de otras vigas.



**Figura IV.76:** Longitud libre máxima de las placas de refuerzo. ("Intervención en estructuras de madera". AITIM)

#### Barras de refuerzo:

La instalación de barras de refuerzo, a modo de armadura, en ranuras practicadas en la superficie o en las caras laterales, permite consolidar un punto intermedio del vano. El inconveniente es que esta solución queda vista desde el exterior (aunque pueden taparse con listones perdidos), y que el refuerzo queda expuesto a las consecuencias de las variaciones higrotérmicas del ambiente y al incendio.

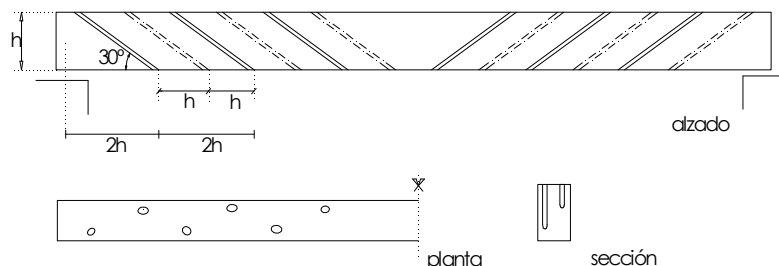
#### Refuerzo con barras inclinadas:

En las secciones de grandes escuadrías es inevitable la aparición de fendas durante el proceso de secado de las piezas. Las contracciones que se producen son mayores en la dirección tangencial que en la radial, provocando grietas radiales. Las consecuencias de este fendado están poco estudiadas aunque se espera que la pieza pierda rigidez.

Para "coser" estas fendas se emplea el Sistema Beta a través de barras inclinadas (ángulos 20 a 30°). Para su colocación se realizan taladros al tresbolillo desde la cara superior, se

sellan las fendas en las caras de la viga y se inyecta la formulación epoxi una vez colocadas las barras de refuerzo.

Algunos ensayos realizados han demostrado una reducción significativa en la flecha de la viga. No obstante, su aplicación es difícil y debe evaluarse si los resultados a obtener, difíciles de cuantificar compensan el esfuerzo a realizar y su coste.



**Figura IV.77:** Refuerzo de vigas fendadas mediante una armadura interior. (Promax, 1982)

#### *Refuerzo con celosía interna:*

En 1981, **Cigni** presenta un estudio experimental en el que comprueba la eficacia de un refuerzo de vigas de madera mediante la introducción de una armadura interior constituida por barras de resina epoxi reforzadas con fibra de vidrio o cable de acero formando una celosía triangulada. Ensayó tres soluciones:

- Celosía con barras de fibra de vidrio formando armadura de compresión y de tracción.
- Celosía con barras de fibra de vidrio y sólo armadura de tracción.
- Celosía con armadura de cable de acero en tracción y barras de vidrio en las diagonales.

En este estudio se ensayan 3 vigas de abeto que se desdoblaron para ensayar una de las mitades sin refuerzo y la otra con el refuerzo. El ensayo se realiza en flexión como viga biapoyada con carga en el centro del vano.

Los resultados muestran un comportamiento elástico con un aumento de la tensión de rotura aparente de un 32 a un 42% y una disminución de flecha de un 59 a un 76%. El número de probetas es muy reducido y no se describe si existe continuidad en las barras de refuerzo. Por otro lado, en la práctica esta ejecución es muy compleja.

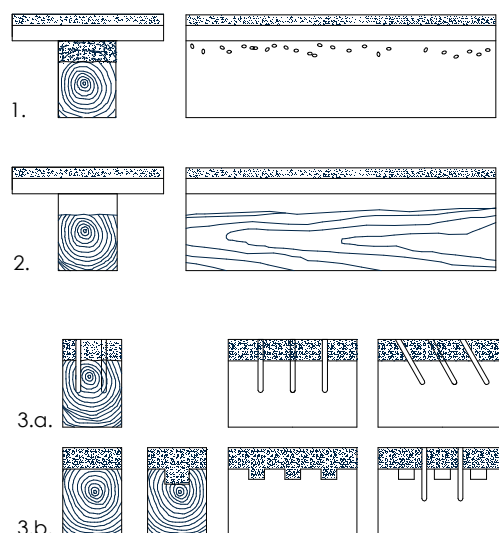
#### *Reconstrucción de la parte superior de la sección de la viga mediante mortero epoxi:*

En ocasiones para recuperar las zonas superiores de las vigas degradadas por las galerías de xilófagos se recurre a unos conectores de barras de poliéster reforzadas con fibra de vidrio. Estos conectores se introducen desde la cara superior de la viga con la ayuda de un pequeño encofrado en los laterales rellenando el volumen original con mortero epoxi.

En general, la adherencia entre la resina y la madera es suficiente para la transmisión de los esfuerzos rasantes debido al esfuerzo cortante, pero se suelen añadir elementos de conexión para garantizar la conexión y evitar un posible vuelco y evitar un posible efecto de despegue perpendicular a la superficie de contacto. También se pueden dejar almenas en la dirección transversal para que el mortero penetre.

Esta solución tiene el inconveniente del elevado gasto de resina en la reparación.





**Figura IV.78:** Reconstrucción de la parte superior degradada de la sección con un mortero epoxi.

#### *Aumento de la sección de la viga mediante piezas de madera encoladas:*

Cuando la sección de la viga de un forjado es insuficiente para cumplir las condiciones de carga y deformación especificadas, se puede aumentar su canto mediante un suplemento de madera unido al borde superior mediante el encolado con una formulación epoxi. Este suplemento puede tener una anchura superior a la de la viga, dando lugar a una sección en T.

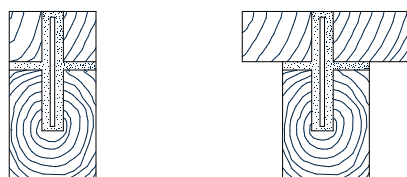
La conexión entre ambas piezas se realiza con una formulación epoxi introduciendo conectores que garanticen la unión, disponiéndolos más juntos en las zonas de los apoyos donde se localiza el mayor cortante.

La madera que se emplea como suplemento debe tener un contenido de humedad próximo al de la madera a reforzar ( $\pm 2-3\%$ ).

La puesta en obra comienza con la limpieza y el cepillado de la superficie de la cara superior de la viga para garantizar el encolado. Sobre la viga se sitúa la pieza de refuerzo y se efectúan los taladros donde se alojan las barras de conexión que quedan encoladas con la formulación epoxi. Para el pegado del refuerzo puede procederse de dos formas:

- 1) Utilizando una formulación de tipo mortero fluido: es necesario disponer un encofrado lateral para evitar que la formulación se escape por las juntas.
- 2) Utilizando una formulación epoxi de consistencia elevada: ésta puede aplicarse con espátula y no se descuelga ni fluye.

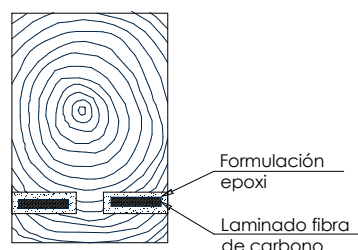
El inconveniente de esta solución es que supone una elevación del nivel del solado y, además, desde abajo la apariencia del forjado cambia, salvo que se disponga o conserve un entablado a nivel de la cara superior de la viga original.



**Figura IV.79:** Aumento de la sección de la viga con el acoplamiento de una pieza encolada.

*Refuerzo con armadura longitudinal de resina reforzada con fibra de carbono:*

Este sistema está patentado por Sika S.A. con el nombre de Carbodur. Consiste en un laminado fabricado con un material compuesto de fibras de carbono con una matriz de resina epoxi. Se presenta en rollos continuos de gran longitud y puede cortarse en obra con facilidad. Se ha empleado en algunas ocasiones para el refuerzo de vigas de madera, actuando como una armadura a tracción en la parte inferior de la viga. Para ello, se realizan ranuras donde se alojan laminados y se encolan con un adhesivo epoxi. También pueden disponerse bajo la sección y taparla con una pieza de madera.



**Figura IV.80:** Refuerzo de una viga con una armadura de fibra de carbono encolada a la madera (Sika Carbodur)

### **IV.3.2.3. Soluciones con acero**

El acero ha sido empleado para la reparación o refuerzo de piezas en flexión con soluciones de diferente eficacia.

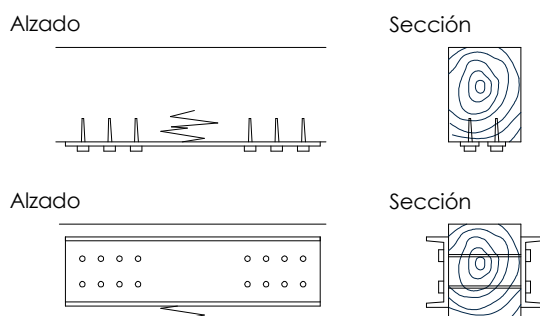
Los principales inconvenientes de estas soluciones son:

- 1) Son poco estéticas al quedar visto el acero.
- 2) Limitan la estabilidad al fuego de la estructura.

*Refuerzo mediante perfiles metálicos:*

La utilización de perfiles y pletinas para la reparación de roturas de vigas es uno de los recursos más inmediatos en la consolidación puntual de obras antiguas. Consiste en la recuperación de la continuidad de la viga mediante perfiles o pletinas adosadas a la madera mediante elementos de fijación mecánica.

El inconveniente es que para que entre en carga el refuerzo exige cierta deformación de la unión, lo que conduce a una eficacia muy pobre; la sección gira y apenas admite cargas.



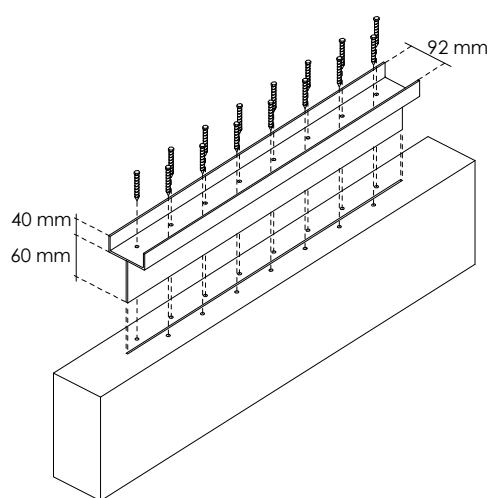
**Figura IV.81:** Reparación puntual de una rotura mediante pletinas. Presenta poca eficacia. (*"Intervención en estructuras de madera"*. AITIM)

En 2010 **González-Bravo et al.** presentan un estudio sobre el empleo de perfiles de acero con sección en U conectados a la madera con tirafondos y situados en la cara superior de

las vigas (Figura IV.82). Esta solución es ensayada en 3 grupos de 10 piezas de madera obteniendo, en cada caso, la rigidez y la capacidad de carga.

- Grupo 1: Piezas de madera laminada encolada de abeto con una sección de 180x200 mm;
- Grupo 2: Piezas de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L);
- Grupo 3: Piezas de madera del género *Pinus* con una sección de 130x150 mm, con 120 años de antigüedad.

Cada grupo se dividió a su vez en dos grupos de 5 piezas cada uno. El primer subgrupo se ensaya sin refuerzo y el segundo con el refuerzo metálico. Todas las piezas son ensayadas a flexión siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE 408, obteniendo el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia a flexión. Los resultados reflejan que el refuerzo incrementa la rigidez entre el 45 y el 98% y la capacidad de carga entre el 27 y el 58%.



**Figura IV.82:** Refuerzo de vigas de madera mediante perfiles metálicos situados en la cara superior (González Bravo et al., 2010)

#### *Refuerzo con atirantado metálico y enanos comprimidos:*

La disposición de tirantes de acero en la parte inferior de la viga permite aumentar la inercia de la pieza, quedando el tirante traccionado y la pieza comprimida (Gramegna et al., 1996). El tirante se apoya y se distancia de la viga a través de enanos metálicos que quedan comprimidos.

El inconveniente de esta solución es la dificultad de anclaje del tirante en los extremos de la pieza.

#### *Sustitución estructural de la madera con perfiles metálicos:*

Esta solución consiste en disponer un perfil de tipo IPE que lleva a otro perfil en U soldado al ala superior. El apoyo en los muros extremos se realiza mediante una base metálica con anclaje metálico o químico según las características del muro.

Otra opción es emplear perfiles en U o en V que abrazan por completo a la vigueta y tienen por tanto menor cuelgue. Estos perfiles están realizados con acero inoxidable para aumentar su durabilidad. Se suelen emplear perfiles deslizantes para alcanzar la longitud exacta de la vigueta evitando tener que fabricarlos a medida.

Todos estos sistemas están patentados por diferentes empresas.

Este estudio nos permite extraer las siguientes conclusiones generales:

1. Los *refuerzos metálicos* presentan el gran problema de la corrosión de los perfiles o las chapas, el mal comportamiento al fuego de este material y el gran impacto visual sobre la estructura. Asimismo, en ocasiones el coste de la reparación pone en cuestión dichas soluciones.
2. En cuanto a las soluciones *con refuerzos de madera*, estas soluciones no presentan el problema de la resistencia al fuego y estéticamente tienen un menor impacto visual sobre la estructura. No obstante, su eficacia ante los esfuerzos de flexión es baja por lo que debe emplearse en zonas donde los requerimientos estructurales sean reducidos.
3. El sistema patentado como *Sistema Beta* tiene el inconveniente de ejecución y coste. Cuando la zona deteriorada es amplia su coste puede resultar elevado debido a la gran cantidad de mortero epoxi requerido.
4. Refuerzos con tecnología epoxi: El desconocimiento es el gran inconveniente de esta solución. No obstante, consideramos que es la solución que más se ajusta a los requisitos exigidos por una reparación. Por esta razón, desde el presente trabajo se propone un estudio de la solución que permita concretar su comportamiento.

### Notas del capítulo:

#### Libros

Ariaga, F., Peraza, F., Esteban M., Bobadilla, I., García, F. "Intervención en estructuras de madera". AITIM (2002). 464 págs. ISBN: 84-873-8124-3.

Bonamini, G., Noferi, M., Togni, M., Uzielli, L. "Il Manuale del Legno Strutturale". Vol. I-V. Mancosu Editore. Roma (2001).

Cigni, G. et al. "Nuove tecniche di consolidamento di travi in legno". Edizione Kappa. Roma (1981).

Méndez Baliela, M. "Rehabilitación de estructuras antiguas de madera en edificios". Trabajo tutorado por el profesor Giambattista de Tommasi del Politécnico de Bari (Italia) para el Master Europeo de Ingeniería de la Construcción 1993-1994. Universidad de Cantabria. (1993-1994). 90 páginas.

Saporiti Machado, J., Dias, A., Cruz, H., Pereira Custódio, J.E., Coutinho Palma, P.M. "Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira". VERLAG (2009). ISBN: 9789896420659.

#### Artículos

Anon. "The age of resin". *The Architects Journal*. February (1982). pp. 56-58.

Ariaga, F. "Estructura mixta de madera y hormigón (Sistema HBS)". AITIM. Nº 206. Madrid, Julio/Agosto (2000). pp. 83-84.

Avent, R., Emkin y Howard&Chapman. "Epoxy repaired bolted timber connections". *Journal of the Structural Division*. April (1976). pp. 821-838.

Bottinelli, G. "Habitat System Beton: ragioni, certificazione, risultati sperimentali". *Adrastea*. Nº 16. (2000).

Cecchi, A. "Rinforzo di solai in legno mediante soletta collaborante in calcestruzzo armato con collegamenti di tipo elastico". *Il restauro del legno*. Vol. 2. Nardini Editore. Florencia (1989). pp. 207-213.

Ceccotti, A. "Timber-concrete composite structures". *Timber Engineering*. STEP 2, E13. Editado por Centrum Hout. Holanda (1995).

Gramegna, F. y Marampon, F. "Dal rilievo del degrado per incendio alle scelte di consolidamento". *Adrastea*. 7/96. (1996). pp. 40-47.

Kreuzinger, H. "Mechanically jointed beams and columns". *Timber Engineering*. STEP 1, B11. Editado por Centrum Hout. Holanda (1995).

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada I. Metodología de puesta en obra". *Revista de Edificación*. Nº 28. Pamplona (1999). pp. 32-38.

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada II. Metodología de puesta en obra". *Revista de Edificación*. Nº 29. Pamplona, Mayo (1999). pp. 30-36.

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada". AITIM. Nº 204. Madrid, Marzo/Abril (2000). pp. 34-38.

Lambillon, J. "Le plancher «Bois-Béton V» de Claude Blouet". *L'Industriel sur Bois*. Janvier (1995). pp. 34-35.

Marradi, P., Messina, C. y Paolini, L. "Recupero di strutture in legno mediante armature parzialmente presollecitate". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 241-247.

Messina, C., Paolini, L. y Sestini, V. "Il recupero statico delle strutture in legno nel Teatro Niccolini di San Casciano de Pesa". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 201-208.

Mettem, C.J., Page, A.V. y Robinson, G.C. "Repair of structural timbers. Part 1: Test on experimental beam repairs". TRADA. Reino Unido (1993).

Mettem, C.J., Page, A.V. y Robinson, G.C. "Repair of structural timbers. Part 2: Fire resistant repairs". TRADA. Reino Unido (1993).

Sistema Beta. Manual técnico del sistema Beta de la empresa PROMAX, Protección de Maderas, S.A.

Stumes, P. "The W.E.R. system manual. Structural rehabilitation of deteriorated timber. Association for Preservation Technology". Ottawa, Canada (1979).

Tampone, G. "Restauro strutturale con lamine metalliche dei solai lignei della sede del Genio Civile di Firenze". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Florencia (1989). pp. 263-281.

Tampone, G., Franci, F. y Campa, L. "Rinforzo di puntoni e consolidamento di una capriata del teatro di Sateano mediante centine metalliche". *Il restauro del legno*. Vol. 1 Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 299-305.

Tampone, G. "Problematiche operative nel cantiere di consolidamento di un solaio ligneo nella sede del genio civile di Firenze". *Legno e restauro*. Editrice Dialogo. Florencia (1989). pp. 207-208.

Tampone, G. "Tipologías estructurales y su respectiva degradación. Seminario «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1998). pp. 59-81.

### Congresos

Feio, A., S. Machado, J., M. Cunha, Vítor. "Reabilitação Estrutural: Análise de Técnicas de Reforço em Estruturas de Madeira". CIMAD-2011. 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal. 7-9 junho 2011.

Monfort, J. y Pardo, J.L. "Reparaciones de forjados mediante hormigón". Seminario de «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Patología de elementos lineales de madera, inspección y diagnóstico. Universidad Politécnica de Valencia. E.U. de Arquitectura Técnica". Valencia, 22 Marzo de 1996.

Monfort, J. y Pardo, J.L. "Reparaciones de forjados mediante hormigón". Seminario de «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. E.U. de Arquitectura Técnica". (1998). pp. 136-168.

Navarrete, A. "Deterioro del material y su protección". Seminario «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1998). pp. 23-56.

## CAPÍTULO V.

# PLAN EXPERIMENTAL

**V.1.** PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

**V.2.** PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL

**V.3.** PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA

**V.4.** PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS

**V.5.** PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS





## **V.1. PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS**

---

V.1.1. EQUIPOS UTILIZADOS

V.1.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

V.1.3. ENSAYOS REALIZADOS

## RESUMEN

La planificación de la fase experimental de los ensayos de termografía de infrarrojos tiene como objetivo principal determinar el alcance de esta técnica en la inspección de estructuras de madera. Para ello, esta fase se ha planteado en función de unos objetivos parciales referidos a continuación:

- Estudio de la influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial.
- Detección de diferentes contenidos de humedad en la madera.
- Detección de defectos internos en función de su profundidad.
- Detección de defectos internos en función de su tamaño.
- Detección de galerías internas en la madera.

### V.1.1. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados en este capítulo han sido cedidos por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA) de Sevilla.

#### **V.1.1.1. Cámara termográfica**

Se ha empleado una cámara termográfica de la marca FLIR que trabaja en la banda espectral de 7,5 a 13  $\mu\text{m}$  (onda larga) y tiene una sensibilidad térmica de 0,10 °C a 30 °C con una precisión de  $\pm 2$  °C,  $\pm 2\%$ . El tipo de enfoque es manual con un campo de visión 23°x17° y una distancia mínima de enfoque de 0,3 m. El tipo de detector es un microbolómetro no refrigerado (FPA) y su resolución es de 320 x 240 píxeles.

#### **V.1.1.2. Equipos auxiliares**

*Estufa de secado:*

Para la estimulación térmica de las probetas se ha empleado una estufa de secado y esterilización de la marca Selecta. Esta estufa tiene una capacidad de 150 litros con unas dimensiones interiores de 50x60x50 cm. Consta de un termostato para la regulación de la temperatura y un termómetro analógicos. Su rango de temperaturas regulables oscila desde los 40 hasta los 250 °C con una estabilidad de  $\pm 0,5$  °C y homogeneidad de  $\pm 2\%$ .

*Xilohigrómetro:*

Las determinaciones de contenido de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra (PSF) se han realizado mediante un xilohigrómetro digital de la marca Protimeter modelo Surveymaster SM y resolución de 0,1%.

El xilohigrómetro es un instrumento que mide la resistencia eléctrica de la madera mediante electrodos en forma de agujas. Su rango de medición puede ser de 0 a 100%. Sin embargo, por debajo del 6% y sobre el 30% (PSF), la conductividad no es la mejor debido al defecto y exceso de agua, por lo que estos valores no deben ser tomados en consideración, tomando como rango fiable de medición entre el 6 y el 28% de contenido de humedad.

La madera tiene una resistencia eléctrica que varía fuertemente con el contenido de humedad y en menor medida con la temperatura. En estado seco (8%) la madera es muy buen aislante eléctrico con una resistencia eléctrica muy elevada (1000 millones de ohmios). Esta resistencia disminuye con la humedad de modo que con un 30% de humedad la resistencia es de 200 mil ohmios y a 80% la resistencia es de apenas 11 mil ohmios. De esto se desprende que la sensibilidad de estos aparatos es mucho más grande a bajas que a altas humedades. No obstante, para contenidos de humedad por debajo del 6%, la resistencia eléctrica es tan alta que la medición es casi imposible.

*Balanza:*

Las determinaciones de contenido de humedad por encima del punto de saturación de la fibra (PSF) se realizan por diferencia de masas entre la madera en estado anhidro y la madera humedecida. Para ello se ha empleado una balanza modelo COBOS cuyo rango de precisión oscila entre 0 y 3000 g. y una precisión de 0,01 g.

*Medidor de condiciones ambientales:*

Las condiciones ambientales (temperatura del aire y humedad relativa) se han medido con un termohigrómetro Hygromaster.

## V.1.2. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

En un ensayo con termografía de infrarrojos intervienen varios factores:

- el operario situado a una distancia y ángulo del objeto
- el objeto observado
- el medioambiente o entorno

Como resultado se obtiene que la energía radiada desde un cuerpo en el rango de infrarrojos y que llega a la cámara termográfica sea la suma de tres componentes:

$$W_{\text{total}} = W_{\text{emitida}} + W_{\text{reflejada}} + W_{\text{transmitida}}$$

siendo;

$W_{\text{total}}$	Energía total que llega a la cámara.
$W_{\text{emitida}}$	Energía emitida por la superficie del objeto.
$W_{\text{reflejada}}$	Energía reflejada por la superficie desde el entorno.
$W_{\text{transmitida}}$	Energía transmitida a través de la superficie.

De este modo, la temperatura obtenida de la medición termográfica es denominada temperatura "aparente"<sup>1</sup>. Para obtener la temperatura "real" del objeto debemos compensar una serie de efectos<sup>2</sup>:

### Emisividad de la superficie

La emisividad de un cuerpo compara la energía que irradia un cuerpo con otro a la misma temperatura que sea un emisor perfecto, es decir, que tenga una emisividad igual a la unidad (cuerpo negro). En estos cuerpos la energía total que llega a la cámara termográfica procede del cuerpo dado que no reflejan ni transmiten energía desde su entorno.

La emisividad depende de la temperatura ( $T^{\circ}$ ), de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y del ángulo de incidencia. Los materiales que tienen valores de emisividad muy bajos (0,1-0,2) suelen tener una alta reflectividad (los metales) de modo que la energía que fluye desde su superficie es fundamentalmente reflejada desde el entorno. En estos objetos la temperatura "aparente" obtenida como resultado de la medición termográfica procede fundamentalmente de la energía reflejada o transmitida desde el entorno.

La madera tiene una emisividad próxima a la unidad (0,90). Como consecuencia, la temperatura "aparente" obtenida como resultado de una medición termográfica procede fundamentalmente del cuerpo y puede considerarse una medición fiable.

### Temperatura ambiente reflejada

La temperatura ambiente reflejada puede definirse como la temperatura de un cuerpo negro hipotético que equivale a todo el entorno. Al compensar este parámetro la cámara resta a la temperatura del cuerpo la temperatura debida al entorno.

<sup>1</sup> Curso teórico-práctico de introducción y aplicaciones de la termografía infrarroja. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid. Marzo 2009.

<sup>2</sup> Balageas, Daniel. "Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END)". V Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires, 2007.

### Temperatura ambiental ( $T_{amb}$ )

Una temperatura ambiente muy alta o baja puede provocar medidas erróneas, enmascarar información y hacer que los equipos pierdan estabilidad.

### Energía absorbida por la atmósfera

En este caso deben tenerse en cuenta la distancia al objetivo, la humedad relativa y la temperatura atmosférica. Estos parámetros son despreciables cuando la distancia del objeto al objetivo está por debajo de los 10 m<sup>3</sup> aunque debe considerarse su importancia a efectos de resolución de la cámara termográfica.

### Distancia y ángulo de visión del objeto con respecto de la cámara

La resolución de las imágenes termográficas disminuye con la distancia. Cada punto de la imagen representa una zona de la superficie del objeto así que un incremento de la distancia implica que cada punto debe hacer referencia a una zona mayor con lo que se produce una pérdida del nivel de detalle<sup>4</sup>.

### Variables meteorológicas (lluvia, nieve, viento)

Para la termografía en exteriores debe tenerse en cuenta las variables meteorológicas (*lluvia, nieve, viento*). En este caso debe considerarse la transmisión de calor por convección en la que la velocidad del viento toma especial relevancia ya que, según estimaciones, vientos de 1 m/s pueden reducir la temperatura de un defecto a la mitad y vientos de 3 m/s pueden hacer desaparecer las diferencias térmicas por completo, con lo que se deduce que en días con viento debe descartarse esta técnica<sup>3</sup>.

De todas estas variables en nuestra cámara termográfica podemos calibrar la emisividad del cuerpo y la temperatura ambiente reflejada. Posteriormente, en el software, podemos completar la información acerca de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la distancia del cuerpo al objetivo de la cámara.

---

<sup>3</sup> Curso teórico-práctico de introducción y aplicaciones de la termografía infrarroja. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid. Marzo 2009.

<sup>4</sup> Balaras, C.A., Argiriou, A.A. "Infrared thermography for building diagnostics". Group Energy Conservation, Institute for Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens, 2002.

### V.1.3. ENSAYOS REALIZADOS

#### V.1.3.1. Influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial

*Material de ensayo:*

Para el estudio de la influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial se han preparado 15 probetas de madera de dimensiones 20x20x300 mm de diferentes especies (roble, álamo, pino, cedro y eucalipto).



**Figura V.1.** Probetas de distintas especies (de izquierda a derecha: roble, álamo, eucalipto, pino, cedro) para ensayo.

Para cada una de las especies se ha determinado su densidad media como la relación entre su masa y su volumen para un contenido de humedad del 12%, determinado mediante xilohigrómetro digital.

**Tabla V.1:** Densidades medias de las distintas especies de ensayo.

ESPECIE	DENSIDAD MEDIA PROBETAS (Kg/m³)
Eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> )	650
Álamo ( <i>Populus Alba</i> )	610
Roble ( <i>Quercus robur</i> )	610
Pino ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	530
Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> )	500

*Procedimiento operatorio:*

El ensayo se ha desarrollado en dos fases:

- *Termografía pasiva:* En esta primera fase se ha tomado la imagen termográfica al conjunto de las piezas sin aplicar ninguna fuente de estimulación externa corrigiendo, previamente, los valores de emisividad y temperatura ambiente reflejada. La temperatura ambiental el día de ensayo ha sido de 26,6 °C.
- *Termografía activa:* En una segunda etapa se han estimulado térmicamente las probetas introduciéndolas en la estufa a 80 °C durante 30 minutos. A continuación, se han extraído las muestras de la estufa y se ha llevado a cabo un seguimiento del proceso de enfriamiento tomando imágenes termográficas cada 30 segundos durante 40 minutos. Como en la fase anterior, en la cámara se han ajustado previamente los parámetros de emisividad del material y temperatura ambiente reflejada. Las condiciones ambientales el día de ensayo han sido 26,6 °C de temperatura y 53% de humedad relativa.

**V.1.3.2. Detección de diferentes contenidos de humedad en la madera**

*Material de ensayo:*

Para analizar el efecto de diferentes contenidos de humedad sobre una imagen termográfica se han preparado 5 piezas de madera de pino gallego (*Pinus Pinaster Ait.*) con distintos contenidos de humedad. Estas piezas, de dimensiones 120 x 23 x 700 mm, son empleadas habitualmente como tablazón para los forjados de madera.

Para conseguir que cada pieza alcance un contenido de humedad diferente en el momento del ensayo se han ido sumergiendo en agua de manera escalonada durante una semana. La humedad alcanzada el día de ensayo por cada probeta se ha calculado por diferencia de masas:

$$\% \text{ humedad} = ((m_w - m_s) / m_s) \cdot 100$$

donde;

$m_w$  Masa de la pieza con humedad en Kg.

$m_s$  Masa de la pieza en estado anhidro en Kg.

Las humedades registradas el día del ensayo se detallan a continuación:

**Tabla V.2:** Humedades de las piezas en el momento de realización del ensayo.

PROBETA Nº	PESO SECO (g)	PESO DÍA DE ENSAYO (g)	HUMEDAD (%)
1	1174,37	1670,83	42,27
2	1214,25	1499,16	23,46
3	759,31	1005,23	32,38
4	1133,12	1323,65	16,80
5	827,07	926,32	12,00

*Procedimiento operatorio:*

El análisis del efecto de la humedad de la sobre una imagen termográfica se ha realizado en *termografía pasiva*. De este modo, sin aplicar ninguna fuente de estimulación externa y corrigiendo los valores de emisividad y temperatura ambiente reflejada, se han tomado varias imágenes termográficas del conjunto de piezas situando la cámara a una distancia de 1,40 m<sup>5</sup> de las piezas.

Las condiciones ambientales el día de ensayo han sido 22 °C de temperatura ambiental y 70% de humedad relativa.

<sup>5</sup> La distancia de la cámara a las probetas se determina por el pequeño tamaño de los defectos que se estudian y por la resolución del detector de infrarrojos del equipo. Tomando distancias pequeñas se evita perder información por este factor.

### **V.1.3.3. Localización de defectos no superficiales**

*Material de ensayo:*

Para estudiar el alcance de la termografía en la detección de defectos no superficiales se han preparado 2 series de 3 probetas de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) cada una en las que se ha simulado, mediante perforaciones, defectos con unas determinadas características geométricas de tamaño y profundidad. El contenido de humedad de las probetas, determinado mediante un xilohigrómetro digital, oscila entre 6 y 8 %.

- Serie 1. *Probetas con defectos situados a distintas profundidades:*

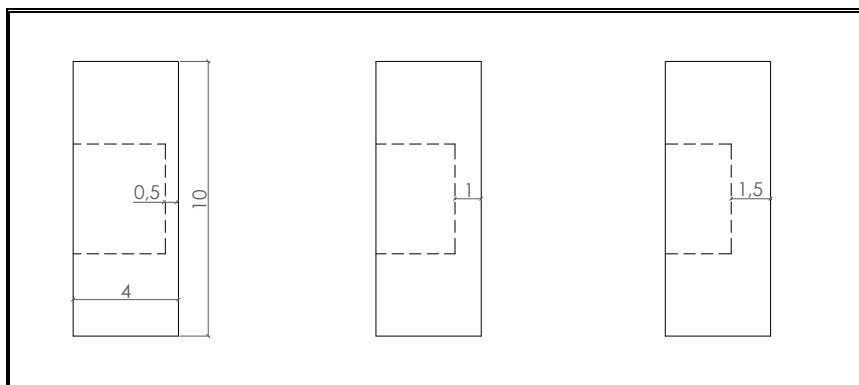
Esta serie consta de 3 probetas de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con unas dimensiones de 100x100x40 mm. En cada probeta se ha realizado una perforación de 40x40 mm, variando su posición con respecto a la superficie de la pieza 5 mm, 10 mm y 15 mm (Figuras V.2 y V.3). A partir del ensayo con estas probetas se pretende determinar la profundidad máxima a la que es posible detectar un defecto.

- Serie 2. *Probetas con defectos de distintos tamaños:*

Esta serie consta de 3 probetas de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con unas dimensiones de 100x100x40 mm. En cada probeta se ha tallado un hueco situado a una misma profundidad de la superficie, 5 mm, pero variando su tamaño 10x10 mm, 20x20 mm y 40x40 mm (Figuras V. 4 y 5). A partir del ensayo con estas probetas se pretende determinar el tamaño mínimo del defecto detectable mediante termografía.

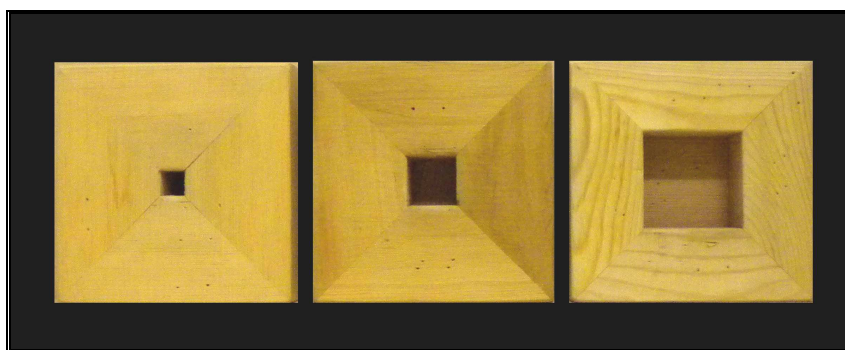


**Figura V.2.** Serie 1. Probetas con defectos de igual tamaño (40x40 mm) situados a distintas profundidades (5, 10 y 15 mm).

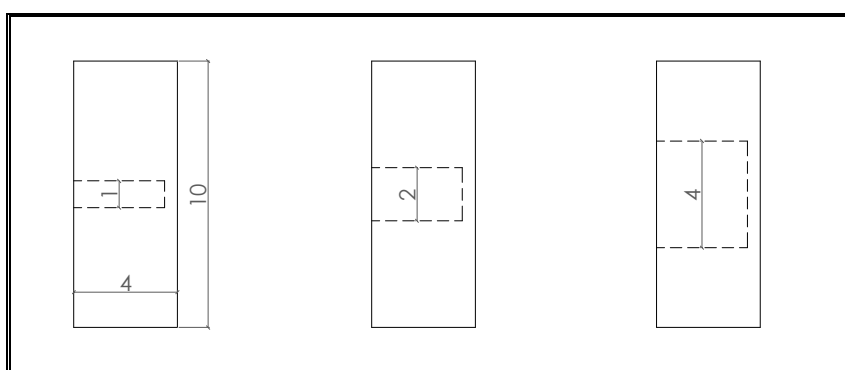


**Figura V.3.** Serie 1. Corte transversal de las probetas. Cotas en cm.





**Figura V.4.** Serie 2. Probetas con defectos de distintos tamaños (10x10, 20x20 y 40x40 mm) situados a profundidad constante (5 mm).



**Figura V.5.** Serie 2. Corte transversal de las probetas. Cotas en cm.

#### *Procedimiento operatorio:*

El procedimiento operatorio seguido con ambas series pretende determinar el alcance de la técnica de termografía en la detección de defectos no superficiales bajo dos supuestos:

1. Que el defecto esté seco, es decir, la humedad del defecto y del resto de la probeta es análoga.
2. Que el defecto esté húmedo, es decir, con un contenido de humedad superior al resto de la probeta. Este supuesto aporta realismo al ensayo ya que normalmente cuando la fase de deterioro está activa la madera presenta un contenido de humedad superior al resto de la madera sana.

Teniendo en cuenta esta premisa el procedimiento experimental se desarrollado en dos fases:

1. Localización de defectos secos no superficiales.
2. Localización de defectos húmedos no superficiales.

### Localización de defectos secos no superficiales:

En esta primera fase se pretende estudiar el alcance de la técnica en la detección de defectos secos determinando:

- Profundidad máxima de dicho defecto. Serie 1.
- Tamaño mínimo del defecto detectable. Serie 2.

Cada una de las series se ha estudiado en ensayos independientes cuyo procedimiento operatorio es el siguiente:

- *Termografía pasiva:* En una primera fase del ensayo, se han tomado las 3 probetas referidas a una misma serie y se han colocado enfrentadas a la cámara termográfica. En todos los casos el deterioro simulado mediante la talla de la perforación queda oculto en la cara opuesta de cada pieza. La distancia de la cámara a las probetas es de 1,20 m. Sin aplicar ninguna fuente de estimulación, termografía pasiva, y, ajustando los parámetros de emisividad y temperatura ambiente reflejada, se ha tomado una primera imagen termográfica del conjunto. Las condiciones ambientales el día de ensayo han sido 24 °C de temperatura ambiental y 50% de humedad relativa.
- *Termografía activa mediante estimulación térmica en estufa:* En una segunda fase, continuando con la misma serie de probetas, se ha aplicado una fuente de estimulación térmica a las piezas, termografía activa, introduciéndolas en la estufa a 80 °C durante 45 minutos. Seguidamente, se han extraído de la estufa y se han colocado, nuevamente, enfrentadas a la cámara situando el deterioro en la cara opuesta a la cámara. La distancia cámara – probetas se mantiene constante, 1,20 m. Tras tomar los parámetros de emisividad y temperatura ambiente reflejada se ha analizado su proceso de enfriamiento tomando imágenes termográficas a intervalos constantes. El objetivo de esta fase es medir el contraste térmico que se genera entre la zona del “defecto” y el resto de la pieza. Las condiciones ambientales coinciden con las descritas en la primera fase del ensayo puesto que ambos ensayos se realizan el mismo día.
- *Termografía activa mediante estimulación térmica con foco portátil:* En esta fase de ensayo se ha planteado cambiar la fuente de estimulación térmica utilizada, la estufa, por un sistema portátil que pueda ser transportado. El objetivo es “escenificar” las circunstancias reales de una obra donde las piezas, (pares, tirantes,...) no pueden ser trasladadas para introducirlas en la estufa y provocar un choque térmico sino que la estimulación térmica debe ser aplicada in situ. De esta forma, se ha empleado un foco de 1500 W que se ha enfrentado a las probetas a una distancia de 0,70 y 0,35 m, respectivamente.

El procedimiento operatorio sigue el esquema descrito, cambiando la modalidad de estimulación térmica de las probetas. De este modo, se han colocado las piezas, agrupadas por series, enfrentadas a la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m interponiendo el foco entre la cámara y las probetas a una distancia de las mismas de 0,70 m (en un primer ensayo para la serie 1) y 0,35 m (para ensayos posteriores con las series 1 y 2). Con esta situación, probetas-foco-cámara el ensayo se ha realizado en reflexión.

Una vez colocados el foco y la cámara termográfica en cada caso y ajustando los parámetros de emisividad y temperatura ambiente reflejada en la cámara, se ha iniciado el proceso de calentamiento. A diferencia de los ensayos anteriores, en los ensayos en reflexión, se mide el contraste térmico alcanzado durante la etapa de calentamiento entre la zona sana y la zona con “defectos” de la probeta. Posteriormente, se ha apagado el foco y se ha realizado el seguimiento del proceso de enfriamiento. La duración de las etapas de calentamiento y enfriamiento para

cada una de las series y ensayos quedan recogidas en la Tabla V.3. La temperatura ambiental el día de ensayo ha sido de 22 °C.

**Tabla V.3.** Duración de las etapas de calentamiento y enfriamiento de cada fase de ensayo para cada una de las series.

	FASE DE ENSAYO	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO
Serie 1	Fase 1 (separación 0,70 m)	582''	1405''
	Fase 2 (separación 0,35 m)	384''	1018''
Serie 2	Fase 2 (separación 0,35 m)	440''	714''

Este modo de ensayo plantea la dificultad de que el calentamiento de las piezas no es homogéneo sino que depende de su situación con respecto al foco. Por otro lado, no se puede controlar la temperatura de estimulación aplicada sino que debe variarse la distancia foco-probeta. Es por ello que los ensayos se plantearon en dos situaciones, situando el foco a 70 y 35 cm de las probetas. En el primer caso, la distancia ha resultado excesiva por lo que los contrastes obtenidos han sido muy ligeros. Por esta razón se ha repetido el ensayo disminuyendo la distancia foco-probetas.

#### Localización de defectos húmedos no superficiales:

En una segunda fase, utilizando las dos series de probetas preparadas, se ha repetido la metodología de ensayo anterior simulando que la zona con “defectos” de las probetas presentan un mayor contenido de humedad que el resto de la madera sana de la pieza. Esta hipótesis le aporta realismo al ensayo ya que, normalmente, en las obras de rehabilitación, la madera que está deteriorada tiene más humedad que la madera sana.

Así, una vez saturadas de humedad las áreas con “defectos” de las piezas introduciendo papel de celulosa empapado de agua, hemos medido el contenido de humedad superficial alcanzado en cada caso mediante xilohigrómetro digital. Las medidas de humedad se han tomado en la cara interna de las muestras (la opuesta a la enfrentada a la cámara para suponer una humedad interior). Los resultados se recogen en la Tabla V.4.

**Tabla V.4.** Contenido de humedad en cada probeta antes de la estimulación térmica en la estufa.

			% HUMEDAD DEFECTO	% HUMEDAD PROBETA
Serie 1	Profundidad de defecto	5 mm	30-35	9-11
		10 mm	30-35	9-11
		15 mm	30-35	9-11
Serie 2	Tamaño de defecto	10x10 mm	30-35	9-11
		20x20 mm	30-35	9-11
		40x40 mm	30-35	9-11

Tras esta primera etapa, el procedimiento operatorio sigue las pautas de la metodología descrita para la *Localización de defectos secos no superficiales*. Se ha suprimido la primera fase de ensayo, termografía pasiva, desarrollando el ensayo en la fase de termografía activa, es decir, una vez aplicada la estimulación térmica a las piezas.

- *Termografía activa*: Se han introducido las probetas en la estufa durante 45 minutos a una temperatura de 80 °C. Tras este periodo de calentamiento se han determinado, nuevamente, los valores de contenido de humedad de las piezas tanto de la zona con “defectos” como del resto de la madera sana. Los resultados han sido los siguientes (Tabla V.5):

**Tabla V.5.** Contenido de humedad en cada probeta tras la estimulación térmica en la estufa.

			% HUMEDAD DEFECTO	% HUMEDAD PROBETA
Serie 1	Profundidad de defecto	5 mm	50-52 <sup>6</sup>	6-8
		10 mm	26-28	6-8
		15 mm	26-28	6-8
Serie 2	Tamaño de defecto	10x10 mm	26-28	6-8
		20x20 mm	26-28	6-8
		40x40 mm	26-28	6-8

#### **V.1.3.4. Detección de galerías internas en la madera**

*Material de ensayo:*

Uno de los objetivos prioritarios propuestos en este trabajo es poder localizar pérdidas de densidad internas provocadas por patologías de origen biótico (tales como agentes xilófagos y/o termitas) mediante termografía de infrarrojos. Con este objetivo, se han preparado 2 lotes de 3 probetas de dimensiones 45x75x45 mm de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) exentas de cualquier ataque y con un contenido de humedad del 8% medido mediante xilohigrómetro digital. En cada una de las piezas se han tallado una serie de galerías de acuerdo al siguiente criterio:

- Serie 1. *Galerías situadas a distinta profundidad de la superficie.*

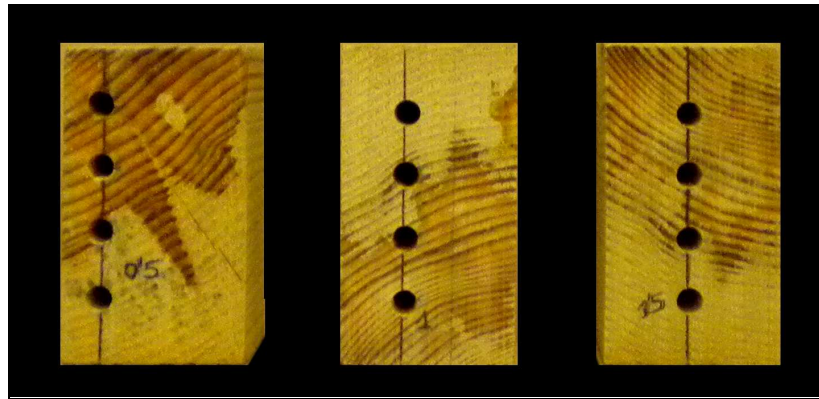
Se ha perforado una columna de 4 galerías de 6 mm de diámetro<sup>7</sup> en cada pieza posicionadas, en cada caso, a una profundidad distinta con respecto a la superficie de la probeta (Figuras V.6 y V.7).

- Serie 2. *Aumento progresivo del número de galerías.*

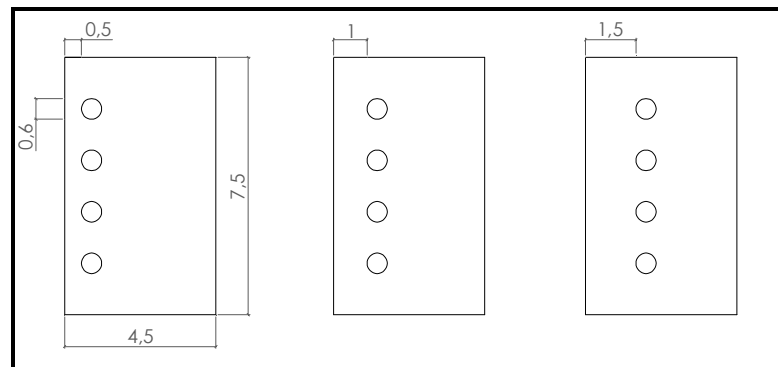
Se ha aumentado progresivamente el número de columnas de galerías perforadas en cada probeta suponiendo una progresiva pérdida de densidad. (Figura V.8 y V.9).

<sup>6</sup> El contenido de humedad en esta probeta se redujo considerablemente tras la estimulación térmica por lo que fue necesario volver a humedecerla.

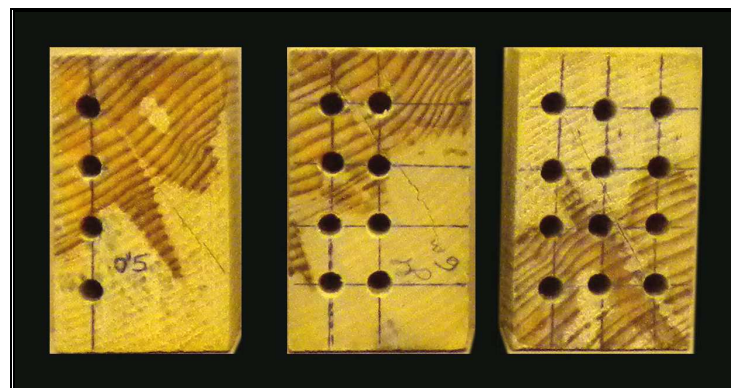
<sup>7</sup> Palaia Pérez, L., Galván Llopis, V., Cervera Moreno, F., Monzó Hurtado, V. “Estimación de la resistencia de la madera en edificios antiguos, por medio de técnicas ultrasónicas”. 1º Congreso Nacional de Tecnología en la Arquitectura. Madrid, 24-26 Noviembre 1994.



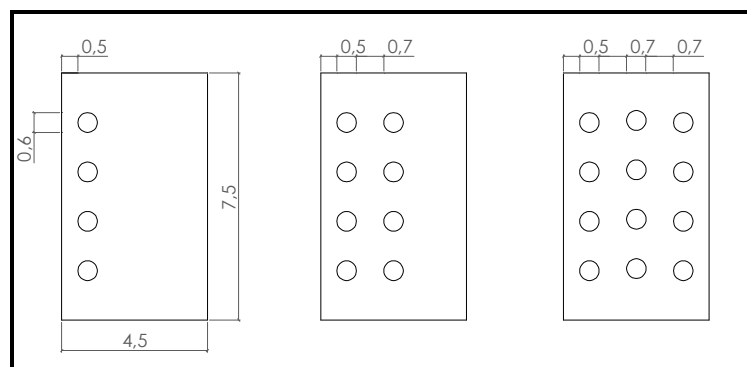
**Figura V.6.** Serie 1. Probetas con una columna de galerías en las que se varía la posición de éstas con respecto a la superficie.



**Figura V.7.** Serie 1. Posición de las columnas de galerías con respecto a la superficie en cada caso. Cotas en cm.



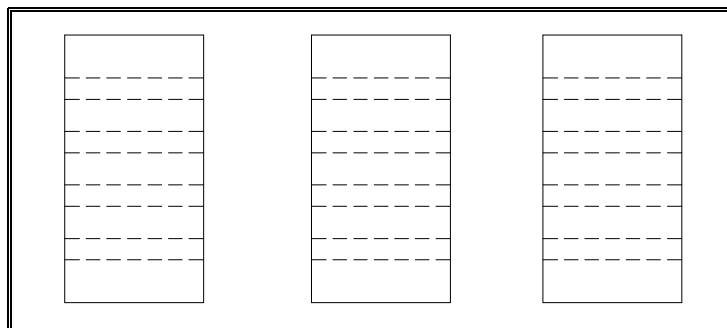
**Figura V.8.** Serie 2. Probetas con un aumento progresivo del número de columnas de galerías.



**Figura V.9.** Serie 2. Posición de las columnas de galerías con respecto a la superficie y separación entre columnas en cada caso. Cotas en cm.

*Procedimiento operatorio:*

Para realizar el ensayo se han colocado las probetas por series de perfil (Figura V.10). El objetivo es simular la sección de una viga de madera en la que existen galerías longitudinales provocadas por un ataque de insectos xilófagos o insectos sociales, por ejemplo termitas.



**Figura V.10.** Series 1 y 2. Situación de las probetas para ensayo. Las galerías quedan ocultas a la cámara termográfica.

El procedimiento operatorio se desarrolla en dos fases y es análogo para las dos series:

- *Termografía pasiva:* En una primera fase del ensayo, se han tomado las 3 probetas referidas a una misma serie y se han colocado de perfil y enfrentadas a la cámara termográfica de forma que el deterioro simulado mediante las galerías queda oculto. La distancia de la cámara a las probetas es de 1,20 m. Sin aplicar ninguna fuente de estimulación, termografía pasiva, y ajustando los parámetros de emisividad y temperatura ambiente reflejada, se ha tomado una primera imagen termográfica del conjunto. Las condiciones ambientales el día del ensayo han sido 20 °C de temperatura ambiental y 58 % de humedad relativa.
- *Termografía activa:* En una segunda fase, continuando con la misma serie de probetas, se ha aplicado una fuente de estimulación térmica a las piezas, termografía activa, introduciéndolas en la estufa a 80 °C durante 30 minutos. Seguidamente, se han extraído de la estufa y se han colocado, nuevamente, enfrentadas a la cámara, según lo descrito, manteniendo constante la distancia cámara – probetas de 1,20 m. Tras tomar los parámetros de emisividad y temperatura ambiente reflejada se ha analizado su proceso de enfriamiento tomando imágenes termográficas a intervalos constantes de 30 segundos. El objetivo de esta fase es medir el contraste térmico que se genera entre las zonas perforadas a partir de las galerías y el resto de la pieza. Las condiciones ambientales coinciden con las descritas en la primera fase del ensayo pues ambos ensayos se realizan el mismo día.

## **V.2. PLAN EXPERIMENTAL DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

---

### **V.2.1. EQUIPOS UTILIZADOS**

### **V.2.2. MATERIAL DE ENSAYO**

### **V.2.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA**

#### **V.2.3.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL**

#### **V.2.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS**

### **V.2.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA**

## RESUMEN

La fase experimental de este capítulo tiene como objetivo actualizar las ecuaciones que correlacionan las velocidades de propagación de ultrasonidos con parámetros resistentes para la especie de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Asimismo, dada la similitud anatómica de esta especie con la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold), se pretende obtener las correlaciones para esta especie. Finalmente, se trata de correlacionar los valores resistentes, obtenidos a partir de ensayos mecánicos, con la asignación de clases resistentes realizada por la normativa de clasificación visual. Para ello esta fase experimental se desarrolla a partir de la metodología referida a continuación:

- Selección del material de ensayo. Preparación de las probetas para ensayo.
- Determinación de las propiedades físicas de las probetas.
- Clasificación visual según norma UNE 56544:2007.
- Medición de ultrasonidos en las direcciones normal, tangencial y longitudinal.
- Ensayos mecánicos según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 408:2011.
- Correlación entre ensayos no destructivos y ensayos destructivos.



## V.2.1. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados en este capítulo han sido suministrados por el laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA) de Sevilla.

### V.2.1.1. Geometría de las probetas y medición de defectos

*Cinta métrica:*

Para determinar las dimensiones de las piezas así como la situación y el tamaño de sus singularidades se ha utilizado una cinta métrica de 2 m. de longitud y 1,0 mm de precisión.

### V.2.1.2. Caracterización de las propiedades físicas

*Xilohigrómetro:*

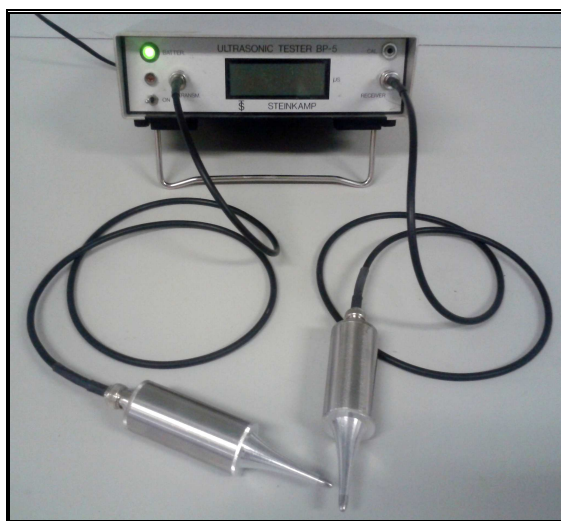
Las determinaciones del contenido de humedad se han realizado mediante xilohigrómetro digital de la marca Protimeter Survey Master SM siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-2:2002.

*Balanza:*

La densidad de las probetas se ha determinado a través de la relación entre la masa y el volumen de las mismas. Para medir la masa se emplea una balanza modelo COBOS cuyo rango de precisión oscila entre 0 y 3000 g. y una precisión de 0,01 g.

### V.2.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos

Para los ensayos de ultrasonidos se ha utilizado un aparato de ultrasonidos modelo BP V de la marca Krautkrämer. Este aparato nos da la lectura del tiempo de retardo en que la onda sale del palpador emisor hasta que es recibido por el palpador receptor, para lo que posee una pantalla de cristal líquido de cinco dígitos, en la que se muestra la lectura de tiempo en microsegundos. La precisión es de  $\pm 0,1 \mu s$ . Para las mediciones se han utilizado unos palpadores cónicos. Estos palpadores contienen cristales piezoeléctricos de circonato de plomo-titanio, y van conectados al aparato mediante dos cables coaxiales. Su frecuencia de emisión es de 50 KHz.



**Figura V.11.** Equipo de ultrasonidos empleado en los ensayos.

### **V.2.1.4. Determinación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad global**

#### *Prensa:*

Para los ensayos de resistencia a flexión conforme a la norma UNE EN 408:2011 se ha utilizado una prensa electromecánica multiensayo servocontrolada, modelo MEM-101/M4 de la marca Suzpecar. Esta dotada de una célula de carga de 20 T y posibilidad de control de funcionamiento mediante un sistema electrónico de regulación por recorrido o por carga. El control por recorrido se encuentra en el rango de velocidad entre 0,1 mm/min y 100 mm/min. Mientras que en el control por carga los límites están entre 0,1 Kg/seg y 100 kg/seg. El pórtico utilizado permite ensayar piezas de hasta 1 m de longitud.



**Figura V.12.** Prensa multiensayo marca Suzpecar y modelo MEM-101/M4.

#### *Micrómetro electrónico:*

Para medir la deformación en el centro de las probetas se ha empleado un micrómetro cuyo rango de medición oscila entre 0-25 mm y una resolución de 0,001 mm.

### **V.2.1.5. Equipos auxiliares**

#### *Estufa de secado:*

Para determinar el contenido de humedad de las probetas mediante el secado de las mismas a  $103 \pm 2$  °C y según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-1:2002 se ha utilizado una estufa de secado de la marca Selecta. Consta de un termostato para la regulación de la temperatura y un termómetro analógicos.

Este procedimiento se emplea para los ensayos con pequeñas probetas, en los que se trata de determinar la influencia de la humedad en la velocidad de ultrasonidos para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

## V.2.2. MATERIAL DE ENSAYO

### V.2.2.1. Elección del material de ensayo

Conforme a lo reseñado en el Estado del Conocimiento, la norma UNE 384:2010 establece que el método de ensayo con pequeñas probetas es aplicable únicamente para frondosas. De este modo, para determinar las capacidades mecánicas de especies coníferas es necesario emplear probetas de tamaño estructural.

La cuantificación de las propiedades mecánicas (resistencia a flexión y a tracción) de cada una de las clases resistentes aportada por el Código Técnico de la Edificación está referida a piezas con una altura de sección ( $h$ ) de 150 mm y una relación altura-longitud de 18 h. Así, para referir los resultados de ensayos realizados con piezas de menor sección debe emplearse la siguiente expresión:

$$k_h = (150/h)^{0,2} \leq 1,3$$

siendo

$h$  canto en flexión en mm.

Si igualamos términos, hallamos que la menor altura de sección admitida por el CTE es 40 mm. Al mantener la relación altura-longitud de la probeta obtenemos que las dimensiones límite de la pieza de ensayo más pequeña son 720 mm de longitud y 40 mm de canto.

Con todo ello, para el desarrollo del presente trabajo de investigación vamos a trabajar con piezas de 50 mm de canto y 1 m de longitud, corrigiendo los resultados obtenidos en los ensayos para referirlos a piezas con una altura de sección de 150 mm.

### V.2.2.2. Madera sana

- Madera nueva:

*Probetas de pino silvestre (Pinus Sylvestris L):*

Los trabajos de investigación precedentes realizados en este Grupo de Investigación<sup>8</sup> ponen de manifiesto que la madera empleada más comúnmente en esta zona para estructuras de edificación es la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

Así, con el objetivo de crear un banco de datos aplicable a la realidad constructiva de una estructura de madera de este entorno se selecciona un lote de 45 piezas de madera nueva de esta especie. Las dimensiones de las piezas de ensayo son 50x50x1000 mm y son suministradas por la empresa Aplicaciones y Tratamientos de la Madera de Valverde del Camino (Huelva).

*Probetas de pino laricio (Pinus Nigra Arnold):*

La bibliografía consultada<sup>9</sup> demuestra la imposibilidad de distinguir anatómicamente las especies de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). El problema radica en la proximidad taxonómica entre ambas especies que, además, comparten un carácter hidrófilo y microtérnico. Aunque las dos especies no tienden a formar masas mixtas, es frecuente encontrarlas próximas entre sí en niveles altitudinales medios y altos del área mediterránea peninsular. Ambas maderas tienen caracteres diagnósticos comunes, como punteaduras tipo pinoide I, que les diferencian de otras especies de pino más

<sup>8</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera mediante técnicas de ultrasonidos". Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

<sup>9</sup> Rodríguez Trobajo, E. Procedencia y uso de madera de pino silvestre y pino laricio en edificios históricos de Castilla y Andalucía. *Arqueología de la arquitectura*, 5. (enero-diciembre 2008), pp. 33-53

xerófilas: el pino pinaster (*Pinus Pinaster* Ait.), el carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y el piñonero (*Pinus Pinea* L.). Así, aunque se han propuesto nuevos caracteres diagnósticos, no se ha logrado una diferenciación segura entre ambas maderas.

Esta situación implica la necesidad de abordar el estudio de esta especie para poder contrastar cuantitativamente los valores de resistencia y velocidad de ultrasonidos de ambas especies ya que en muchos edificios de Andalucía y Castilla aparecen mezcladas. Para ello se ha seleccionado un lote de madera nueva compuesta por 52 piezas de dimensiones 50x50x1000 mm y suministradas por la empresa Madera Mm C.B. de Siles (Jaén).

Asimismo se selecciona un lote de *pequeñas probetas* para realizar un estudio comparativo con los resultados obtenidos en investigaciones precedentes<sup>10</sup> (actualmente fuera de normativa) con pequeñas probetas de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). De esta forma, se ensayan 42 piezas de 20x20x300 mm talladas a partir de un lote de 15 piezas de dimensiones 90x120x300 mm suministrado por la empresa Pedro Arroyo Maderas de Orcera (Jaén).

- Madera vieja:

*Probetas de pino silvestre (Pinus Sylvestris L):*

Se seleccionan 37 piezas de dimensiones 50x50x1000 mm. La madera es obtenida de una obra de rehabilitación situada en el casco histórico de Sevilla, en la calle Lineros nº 11. De esta obra se extraen muchos de los pares y vigas de sus forjados que son tallados para el ensayo según las dimensiones dadas.

### **V.2.2.3. Madera deteriorada**

*Probetas de pino silvestre (Pinus Sylvestris L):*

Se seleccionan 10 vigas suministradas por la empresa Excavaciones y Demoliciones Alcalá procedentes de un derribo de una vivienda situada en el centro histórico de Sevilla. La heterogeneidad de su deterioro impide extraer piezas de 50x50x1000 mm que contengan una pérdida de densidad uniforme. Por ello, en este caso, se decide trabajar con pequeñas probetas de 20x20x300 mm donde queden representadas pérdidas de densidad uniformes. Así, aunque fuera de normativa, su empleo queda justificado por la naturaleza del estudio en el que se pretende establecer la relación entre la velocidad de ultrasonidos y la pérdida de resistencia de una pieza.



**Figura V.13.** Vigas de madera deteriorada para la extracción de pequeñas probetas.

<sup>10</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera mediante técnicas de ultrasonidos". Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).



#### **V.2.2.4. Material auxiliar**

Para determinar la influencia de ciertos factores sobre las velocidades de transmisión de ultrasonidos se ha empleado el siguiente material de ensayo:

*Madera de pino laricio (Pinus Nigra Arnold):*

- Lote de 15 piezas de dimensiones 90x120x300 mm suministrado por la empresa Pedro Arroyo Maderas de Orcera (Jaén). Con estas piezas se pretende extraer el coeficiente corrector de la velocidad normal.



**Figura V.14.** Lote de 15 piezas de madera de pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*) de dimensiones 90x120x300 mm.

- Lote de 3 piezas de dimensiones 20x20x300 mm para medir la influencia de la humedad en la velocidad de ultrasonidos. Estas piezas han sido extraídas del lote anterior.

*Madera de pino silvestre (Pinus sylvestris L):*

- Viga con una sección transversal de 150 mm. De esta pieza se han extraído "rebanadas" de 30 mm de espesor cuyas secciones transversales se ha ido reduciendo hasta alcanzar una sección de 10 mm.



**Figura V.15.** "Rebanadas" de 30 mm de espesor extraídas de una viga de 150 mm de sección transversal.

### V.2.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

El procedimiento experimental sobre madera sana se realiza agrupando el material en lotes. De esta manera, en función de las dimensiones de las piezas, se crean dos grandes lotes, probetas de tamaño estructural y pequeñas probetas. Para cada uno de estos lotes se desarrolla un procedimiento de ensayo específico apoyado en diferentes normas UNE. Dentro de cada lote, cada pieza se clasifica en función de su especie y edad.

Lote 1: Madera nueva y vieja, probetas de tamaño estructural.

	Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm³)
Madera nueva	<i>Pinus Sylvestris</i> L	45	50x50x1000
	<i>Pinus Nigra</i> Arnold	52	50x50x1000
Madera vieja	<i>Pinus Sylvestris</i> L	37	50x50x1000

Lote 2: Madera nueva, pequeñas probetas.

	Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm³)
Madera nueva	<i>Pinus Nigra</i> Arnold	42	20x20x300

El desarrollo experimental seguido en cada caso se desarrolla en apartados sucesivos.

#### V.2.3.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL

A continuación se desarrolla el proceso de ensayos, destructivos y no destructivos, realizado sobre las probetas de tamaño estructural, piezas de dimensiones 50x50x1000 mm³ (lote 1). Dentro de este lote, se distingue entre los siguientes grupos de piezas: madera nueva (45 probetas de *Pinus Sylvestris* L y 52 probetas de *Pinus Nigra* Arnold) y madera vieja (37 probetas de *Pinus Sylvestris* L).

##### V.2.3.1.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

La primera fase del procedimiento experimental engloba los ensayos realizados mediante técnicas no destructivas. Esta fase comprende la determinación de las propiedades físicas de las probetas (densidad y contenido de humedad), su clasificación visual conforme a la norma española UNE 56544:2007 y la medición de las velocidades de ultrasonidos. El desarrollo de este proceso queda recogido en los Anejos 8, 9 y 10.

##### V.2.3.1.1.1. Preparación de las probetas para ensayo

La primera fase del desarrollo experimental ha consistido en sistematizar el proceso de ensayo. Para ello, para cada probeta se ha seguido el siguiente esquema:

1. Numeración de la probeta con identificación de la especie.
2. Nombramiento de cada una de sus caras (a, b, c, d) para localizar los defectos y singularidades medidos en la clasificación visual.
3. Nombramiento de las testas (T y T') para localizar la anchura de los anillos de crecimiento en cada una de ellas según lo especificado en la norma de clasificación visual UNE 56544:2007.
4. Medición de su geometría (longitud, escuadrías).
5. Trazado de las líneas de división de las posiciones de punto medio, 18h y 6h para el posterior ensayo de determinación del módulo de elasticidad global y resistencia a flexión según norma UNE EN 408:2011.

#### **V.2.3.1.1.2. Determinación de las propiedades físicas**

*Contenido de humedad:*

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-2:2002.

Dada la separación temporal entre la fase de ensayos no destructivos (caracterización geométrica de las probetas, determinación de sus propiedades físicas, clasificación visual y ensayos de ultrasonidos) y la fase de ensayos destructivos (determinación de las propiedades mecánicas) se han realizado dos lecturas del contenido de humedad de las probetas, una en cada etapa del proceso experimental.

De esta manera las correcciones de las variables que dependan del contenido de humedad están referidas al momento justo del ensayo.

La corrección de algunas variables con respecto a una humedad de referencia se debe al hecho de que algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera varían cuando su contenido de humedad es inferior al 30%, punto de saturación de la fibra (PSF).

De esta manera siguiendo la metodología descrita en la norma UNE EN 408:2011, tanto el contenido de humedad de la madera como su densidad deben determinarse a partir de una sección completa de la pieza libre de nudos y bolsas de resina y mediante su secado en estufa según la norma UNE-EN 13183-1:2002. No obstante, debido al número de piezas a ensayar este proceso puede resultar muy tedioso, de ahí que para el presente estudio se haya decidido realizar las mediciones mediante xilohigrómetro digital. La bibliografía consultada<sup>11</sup> demuestra que la variación entre las mediciones realizadas mediante secado en estufa y xilohigrómetro digital no sobrepasa el 5% por lo que estas mediciones se consideran precisas.

*Densidad:*

La densidad de cada una de las piezas se ha determinado a partir de la relación entre la masa y el volumen de las mismas. De esta manera se obtiene la densidad "global" de cada una de las probetas.

El valor obtenido es corregido a una humedad de referencia del 12% de acuerdo con lo descrito en la norma UNE-EN 384:2010, de modo que cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse en un 0,5 % por cada 1% de variación del contenido de humedad.

#### **V.2.3.1.1.3. Clasificación visual según UNE 56544:2007**

La norma de clasificación visual UNE 56544:2007 se apoya en una serie de parámetros para establecer dos calidades visuales para la madera estructural, ME-1 y ME-2. Estos parámetros cuantifican las singularidades ligadas a la anatomía de la madera, al aserrado de las piezas y, finalmente, considera si se ha producido alguna alteración de tipo biológico por hongos o insectos xilófagos.

A continuación se muestra la Tabla V.6. como resumen de los criterios reflejados en la norma UNE 56544:2007.

---

<sup>11</sup> Iñiguez González, G. "Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas estructural de gran escuadría para uso estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2007).

Todo el proceso de clasificación de cada una de las probetas queda recogido en las fichas mostradas en las páginas sucesivas. Para cada probeta, como se muestra en las fichas, se proyectan sus caras y sus testas, con la disposición de los anillos de crecimiento así como la situación y el tamaño de cada una de las singularidades y defectos.

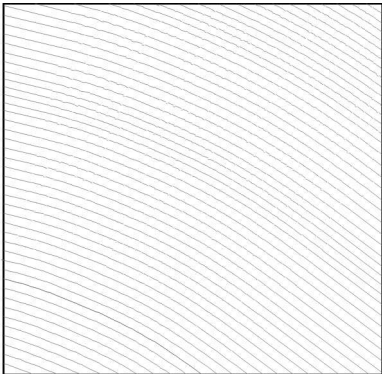
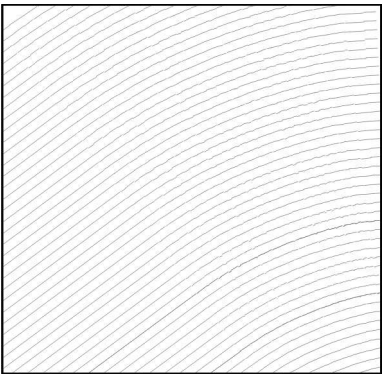
**Tabla V.6.** Criterios de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/5 \text{ "h"}$	$d \leq 1/2 \text{ "h"}$
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2 \text{ "b"}$ y $d \leq 30 \text{ mm}$	$d \leq 2/3 \text{ "b"}$
Anchura máxima del anillo de crecimiento <sup>(1)</sup> : - Pino silvestre - Pino laricio		$\leq 4 \text{ mm}$ $\leq 5 \text{ mm}$	Sin limitación Sin limitación
Fendas		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	De secado <sup>(2)(3)</sup>	Las fendas de secado solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dos dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.	
	Rayo Heladura Abatimiento	No permitidas	
Acebolladuras		No permitidas	
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5 "h".	
Madera de compresión		Admisible en 1/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza.	Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza.
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Gemas: - Longitud - Dimensión relativa		$\leq 1/4 \text{ de "L"}$ $g \leq 1/4$	$\leq 1/3 \text{ de "L"}$ $g \leq 1/3$
Médula <sup>(1)</sup>		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
Alteraciones biológicas: - Muérdago - Azulado - Pudrición - Galerías de insectos xilófagos		<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se admite</li> <li>- Se admite</li> <li>- No se admite</li> <li>- No se admite</li> </ul>	
Deformaciones máximas <sup>(2)(3)(4)</sup> : - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Abarquillado		10 mm (para 2 m de longitud)  8 mm (para 2 m de longitud)  1 mm (por cada 25 mm de h) (para 2 m de longitud)  1/25 de "h"	20 mm (para 2 m de longitud)  12 mm (para 2 m de longitud)  2 mm (por cada 25 mm de h) (para 2 m de longitud)  1/25 de "h"
<p><sup>(1)</sup> Estos criterios se considerarán cuando se comercializa en húmedo.</p> <p><sup>(2)</sup> Estos criterios no se considerarán cuando la clasificación se realiza en húmedo.</p> <p><sup>(3)</sup> Referidas a un 20% de contenido de humedad.</p> <p><sup>(4)</sup> Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso entre el suministrador y el cliente.</p>			



ESPECIE	PROBETA N°
---------	------------

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Dimensiones (cm)	
Peso (gr)	
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	

TESTAS	DISPOSICIÓN ANILLOS	
T		
	Anchura máxima del anillo de crecimiento	
	Anillos cm	
	Clasificación	
T'		
	Anchura máxima del anillo de crecimiento	
	Anillos cm	
	Clasificación	

SITUACIÓN DE DEFECTOS

	A	B	C	D
T'				
T				

Probeta 3. Escala 1:4.

**MEDICIÓN DE DEFECTOS**

NUDO Nº	Cara	Vivo/ Muerto	Adherente/ Saltadizo	Pasante/ Transversal	Diámetro d (mm)	d/h	Clasificación

FENDA Nº	Cara	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Profundidad (mm)	Clasificación

Bolsas de resina y entrecasco	Cara	Longitud L (mm)	L/h	Clasificación

Desviación de la fibra	Desviación / longitud (y/x)	Clasificación

CLASIFICACIÓN DE LA PROBETA	
-----------------------------	--

### **V.2.3.1.1.4. Medición de las velocidades de ultrasonidos**

Varios investigadores<sup>12</sup> han estudiado los factores que afectan a las velocidades de propagación de ultrasonidos en la madera. Para ello siempre que se realicen medidas de ultrasonidos deben tenerse en cuenta los siguientes factores para establecer las correcciones necesarias.

*Factores que intervienen en la velocidad de ultrasonidos:*

#### Tipo de madera

Cada especie de madera tiene un rango de velocidad de ultrasonidos característico. Esto es así porque las velocidades de transmisión de ultrasonidos están afectadas por la estructura interna de la madera. En este trabajo abordaremos el estudio de las especies pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), por ser la madera más comúnmente utilizada en construcción en esta zona, y el pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) lo que conlleva a que su distinción a partir de una inspección visual resulte impracticable.

#### Humedad

La humedad es un factor que influye significativamente en las propiedades mecánicas de la madera cuando su contenido es inferior al 30%, punto de saturación de la fibra (PSF). Por encima de este valor, las propiedades se mantienen prácticamente constantes.

El estudio de su influencia sobre las velocidades de transmisión ha sido abarcado por varios investigadores<sup>13</sup>. En España, la tesis de Rubio de Hita<sup>14</sup>, recoge el estudio de la influencia de la humedad sobre las velocidades de transmisión para la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), especie incluida en este estudio.

En el presente trabajo se estudia la influencia de la humedad sobre las velocidades de transmisión para la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Para ello se emplean las tres probetas definidas en el Capítulo V.2.2.4. de dimensiones 20x20x300 mm. Estas probetas se sumergen en agua (Figura V.16) hasta conseguir su saturación (100% de humedad). Posteriormente, se extraen y se secan en estufa, según norma UNE-EN 13183-1:2002, hasta alcanzar el estado anhidro (0% de humedad). Durante este proceso de secado, en diferentes instantes, se realizan mediciones de las velocidades de propagación en las direcciones longitudinal y perpendicular a la fibra.



**Figura V.16.** Probetas de dimensiones 20x20x300 mm<sup>3</sup> sumergidas hasta conseguir su saturación.

<sup>12</sup> Beall, F.C. "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties". *Wood Science and Technology*. Vol. 36, Nº 3. (1999), pp 197-212. DOI: 10.1007/s00226-002-0138-4.

<sup>13</sup> Sandoz, J.L. "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading". *Wood science and technology*. Vol. 27. (1993). pp. 373-380.

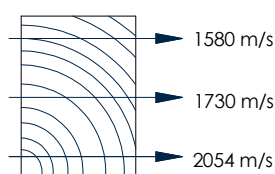
<sup>14</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

El estudio de la influencia de la humedad pretende:

1. Determinar el porcentaje de variación de las velocidades según las distintas direcciones (normal y longitudinal a la fibra) cuando la humedad varía con respecto a la humedad de equilibrio (12%) y el punto de saturación de las fibras (28%).
2. Establecer la correlación que existe entre la humedad y las velocidades de ultrasonidos, normal y longitudinal. De esta forma se cuantifica la corrección que debe aplicarse para referir todas las velocidades al 12% de humedad.

#### Posición de los anillos de crecimiento / Posición de la fibra

En la medición de las velocidades de transmisión en la sección de una viga, la posición relativa de los transductores con respecto a la posición de los anillos de crecimiento da lugar a valores de velocidad muy heterogéneos dentro de la misma sección (Figura V.17).



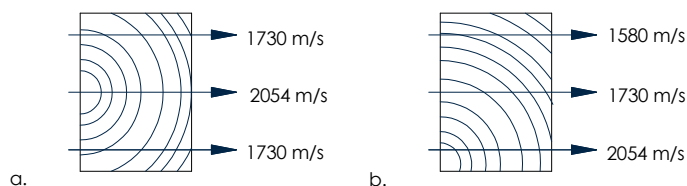
**Figura V.17.** Ejemplo de variabilidad de las velocidades de transmisión dentro de una sección.

Los resultados de estas mediciones no pueden ser comparados entre sí, por estar referidos a distintas orientaciones de los anillos. Por esto es necesario, al igual que con la humedad, corregir esta desviación y referir todas las mediciones a una misma posición de fibra.

Este hecho cobra especial relevancia en la inspección de estructuras en las que, para detectar el deterioro interno de la madera, empleamos las velocidades de transmisión normales (perpendiculares a la fibra). En estos casos, esta dispersión de resultados puede ser interpretada como una pérdida de densidad.

Con todo ello, en el trabajo de investigación de Rubio de Hita<sup>15</sup> se determina un coeficiente de conversión a velocidad normal para la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) que permite referir todas las mediciones, independientemente de la posición de los anillos con respecto a los transductores, a una posición perpendicular a los anillos (normal).

En el presente trabajo se estudia la influencia de la posición de los anillos de crecimiento sobre las velocidades de transmisión para la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Para ello se emplea el lote de 15 piezas de dimensiones 90x120x300 mm definidas en el Capítulo V.2.2.4. Estas piezas se clasifican en función de la posición de sus anillos de acuerdo al siguiente criterio (Figura V.18):



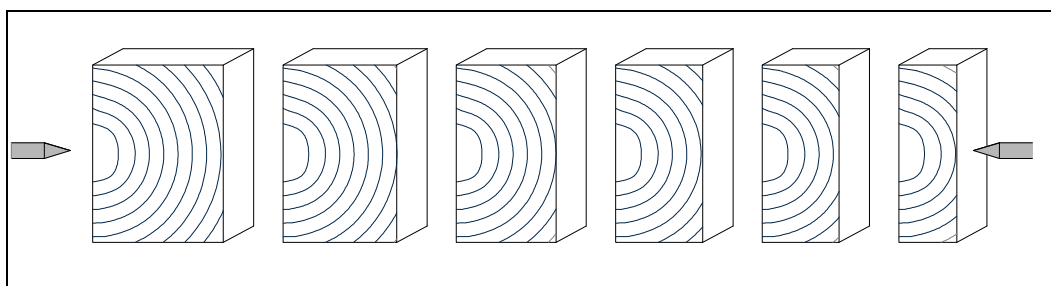
**Figura V.18.** Clasificación de las piezas en función de la posición de la fibra (a. Posición central, b. Posición extrema)

<sup>15</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

### Distancia entre transductores

En el presente trabajo se ha determinado una nueva variable que interviene significativamente en las velocidades de transmisión de ultrasonidos, la separación entre los transductores. Esta variable interviene considerablemente en las mediciones realizadas en las velocidades normales (perpendiculares a la fibra), en la que la separación entre los transductores está condicionada por la escuadría de las piezas de ensayo.

Para definir la influencia de la distancia entre los transductores de ultrasonidos en la medición de las velocidades normales (perpendiculares) a la fibra, se emplea una viga de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con una sección transversal de 150 mm de ancho, definida en el Capítulo V.2.2.4. De esta pieza se han extraído "rebanadas" de 30 mm de espesor variando las dimensiones de su sección transversal hasta un tamaño mínimo de 10 mm (Figura V.19). Sobre cada "rebanada" se ha procedido a medir la velocidad de ultrasonidos entre sus cantos (perpendicular a la dirección de la fibra), realizándose una única medida en cada sección coincidiendo con la dirección perfectamente normal a la fibra para eliminar las dispersiones posibles.



**Figura V.19.** Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas.

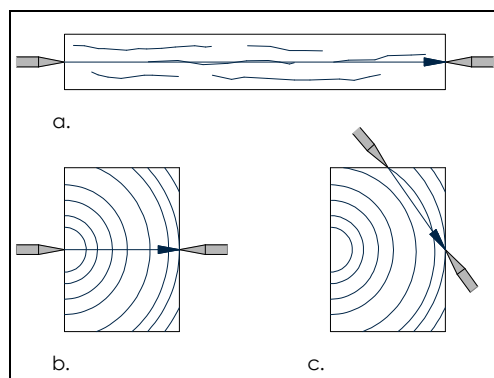
### Dirección de la fibra

La madera se caracteriza por tener tres ejes de simetría perpendiculares entre sí (longitudinal, radial y transversal) según su estructura de crecimiento. Para cada una de estas direcciones, las propiedades mecánicas de la madera adquieren valores diferentes. De igual manera, el rango de velocidad de ultrasonidos para cada eje tiene un valor característico.

Teniendo en cuenta estos factores y aplicando las correcciones que se han determinado para cada caso, se han realizado las siguientes mediciones sobre cada probeta:

→ Medidas de transmisión de ultrasonidos directas (palpadores de ultrasonidos enfrentados) (Figura V.20):

- Mediciones longitudinales: mediciones de testa a testa en la dirección paralela a la fibra recorriendo el total de la longitud de la pieza.
- Mediciones normales: mediciones en los cantos de las piezas perpendiculares a los anillos de crecimiento.
- Mediciones tangenciales: mediciones en los cantos de las piezas tangenciales a los anillos de crecimiento.

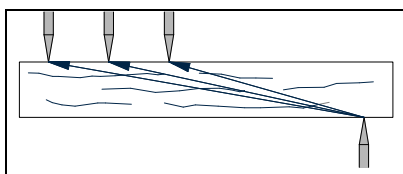


**Figura V.20.** Medidas de transmisión de ultrasonidos directas (a. Mediciones longitudinales, b. Mediciones normales y c. Mediciones tangenciales).

Las mediciones tangenciales son medidas teóricas, factibles a nivel de ensayo en laboratorio puesto que, en una inspección in situ, no se conoce la posición de los anillos de crecimiento y, en consecuencia, no se pueden orientar los palpadores adecuadamente.

→ Medidas de transmisión de ultrasonidos semidirectas (palpadores de ultrasonidos no enfrentados) (Figura V.21):

- Mediciones longitudinales cruzadas: mediciones semidirectas cruzadas atravesando diagonalmente las piezas desde una cara a la opuesta en tramos de longitud igual a 6 veces la altura (6h), 12 veces la altura (12h) y 18 veces la altura (18h).



**Figura V.21.** Medidas de transmisión de ultrasonidos semidirectas (Mediciones longitudinales cruzadas).

Todas las mediciones de ultrasonidos realizadas en cada probeta quedan recogidas en la ficha mostrada a continuación.

**MEDICIONES DE HUMEDAD (Fase 1)**

	Cara A	Cara B	Cara C	Cara D	MEDIA	MEDIA PROBETA
T						
T'						

**MEDICIONES DE VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS**

LONGITUDINALES

L (m)	T( $\mu$ s)	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>L12</sub> (m/s)

LONGITUDINALES CRUZADAS

Medidas de tiempo ( $\mu$ s)

L (m)	T <sub>1</sub> ( $\mu$ s)	T <sub>2</sub> ( $\mu$ s)	T <sub>3</sub> ( $\mu$ s)	T <sub>4</sub> ( $\mu$ s)	T <sub>media</sub> ( $\mu$ s)

Medidas de velocidad (m/s)

L (m)	V <sub>1</sub> ( $\mu$ s)	V <sub>2</sub> ( $\mu$ s)	V <sub>3</sub> ( $\mu$ s)	V <sub>4</sub> ( $\mu$ s)	V <sub>media</sub> ( $\mu$ s)

TRANSVERSALES

Perpendiculares a la fibra (Normales)

L (m)	T( $\mu$ s)	V <sub>N</sub> (m/s)	V <sub>N12</sub> (m/s)

Tangenciales a la fibra

L (m)	T( $\mu$ s)	V <sub>T</sub> (m/s)	V <sub>T12</sub> (m/s)

RELACIÓN ENTRE VELOCIDADES

V <sub>L</sub> /V <sub>N</sub>	V <sub>L</sub> /V <sub>T</sub>	V <sub>N</sub> /V <sub>T</sub>	

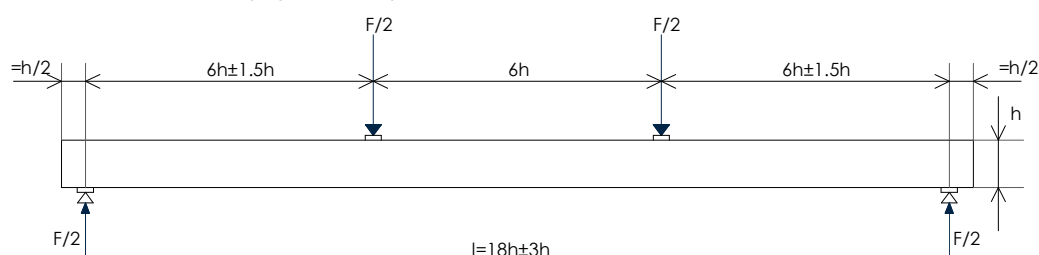


### V.2.3.1.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

En una segunda fase se han realizado los ensayos destructivos. Mediante estos ensayos se determinan las propiedades mecánicas de las piezas, resistencia a flexión y módulo de elasticidad global según el procedimiento definido en la norma UNE-EN 408:2011. Previamente, se ha vuelto a medir el contenido de humedad de las probetas (fase 2) mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica y según norma UNE EN 13183-2:2002 para corregir los resultados de los ensayos conforme a la humedad de referencia.

#### V.2.3.1.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR)

Según la norma UNE EN 408:2011 para determinar la resistencia a flexión se aplica una carga sobre dos puntos simétricos de la probeta, situada simplemente apoyada, a una velocidad constante de 0,15 mm/s hasta alcanzar la rotura de la pieza en un tiempo estimado de  $300 \pm 120$  s (Figura V.22).



**Figura V.22.** Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad.

La resistencia a flexión  $f_m$ , se calcula mediante la ecuación:

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- $F_{\max}$  Carga de rotura registrada en el ensayo en newtons, N.
- $a$  Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión en milímetros, mm.
- $W$  Módulo resistente en milímetros elevados a la tercera potencia,  $\text{mm}^3$ .

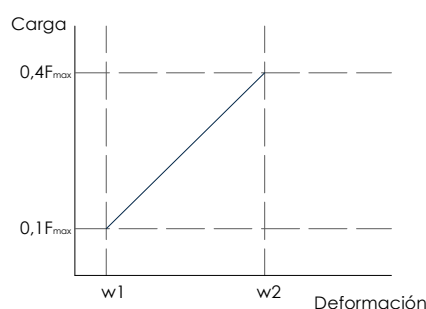
Para cada probeta se anota la forma de rotura y las características de crecimiento de la sección de rotura.



**Figura V.23.** Rotura de las probetas en la prensa.

**V.2.3.1.2.2. Determinación del módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$  o MOE)**

A partir del ensayo de flexión se extraen los datos necesarios para determinar el módulo de elasticidad global de cada probeta. En cada ensayo de flexión realizado debe anotarse la deformación en el centro de la luz de la pieza conforme va aumentando la carga aplicada hasta llegar a la rotura. De esta forma se traza el gráfico carga-deformación del que emplearemos el tramo comprendido entre 0,1 y 0,4 de la  $F_{max}$  del ensayo de flexión para un análisis de regresión. Se debe buscar el tramo más largo de esta sección que tenga un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor partiendo de la condición de que esta parte del gráfico incluya al menos el tramo comprendido entre 0,2 y 0,3 de la  $F_{max}$ .



**Figura V.24.** Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica.

El módulo de elasticidad global  $E_{m,g}$  se determina a partir de la expresión siguiente<sup>16</sup>:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión en milímetros, mm.
- l Luz en flexión en milímetros, mm.
- $F_2 - F_1$  Incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.
- $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

Según la norma UNE EN 384:2010, el módulo de elasticidad global debe ser corregido con respecto a una humedad de referencia como sigue:

*“En el caso de muestras ensayadas en condiciones distintas a las de referencia, 12%, pero con un contenido de humedad medio dentro del intervalo comprendido entre el 10% y el 18%, la corrección para el 5º percentil debe ser del 1% por cada variación del 1% del contenido de humedad”.*

A partir del módulo de elasticidad global puede obtenerse el módulo de elasticidad local o “verdadero”,  $E_{m,l}$ . La norma UNE EN 384:2010 plantea la siguiente expresión:

$$E_{m,l} = 1,3E_{m,g} - 2690 \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$E_{m,g}$  Módulo de elasticidad global en N/mm<sup>2</sup>.

<sup>16</sup> La expresión del Módulo de Elasticidad Global dada es la recogida en la edición de la norma UNE EN 408 de 2004. En la edición de 2011 la expresión matemática cambia pero los resultados obtenidos en ambos casos coinciden. Se aporta la expresión dada en la edición de 2004 por haber sido la expresión empleada en el desarrollo de esta investigación.

**MEDICIONES DE %HUMEDAD (Fase 2)**

	Cara A	Cara B	Cara C	Cara D	MEDIA	MEDIA PROBETA
T						
T'						

**ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RESISTENCIA A FLEXIÓN SEGÚN  
UNE EN 408:2011 Y UNE 384:2010**

	Carga rotura ( $F_{max}$ )	
Módulo de elasticidad en flexión, MOE <sup>17</sup> (N/mm <sup>2</sup> )		
Resistencia a flexión, MOR <sup>18</sup> (N/mm <sup>2</sup> )		

Rotura en ensayo

<sup>17</sup> El Módulo de Elasticidad Global en flexión se designa por las siglas  $E_{m,g}$  o MOE.

<sup>18</sup> La Resistencia a Flexión se designa por las siglas  $f_m$  o MOR.

### V.2.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS

A continuación se desarrolla el proceso de ensayos, destructivos y no destructivos, realizado sobre pequeñas probetas, piezas de dimensiones 20x20x300 mm<sup>3</sup> (lote 2). Dentro de este lote, se distingue únicamente un grupo de piezas de madera nueva compuesto por 42 probetas de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Los ensayos sobre madera de pino silvestre fueron realizados en trabajos precedentes del Grupo de Investigación cuya base de datos ha sido empleada en etapas posteriores.

#### V.2.3.2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

La fase de ensayos no destructivos con pequeñas probetas comprende la determinación de sus propiedades físicas (densidad y contenido de humedad) y la medición de las velocidades de ultrasonidos. No se ha realizado el proceso de clasificación visual dado que se utilizan piezas libres de defectos.

##### V.2.3.2.1.1. Preparación de las probetas para ensayo

La primera fase del desarrollo experimental ha consistido en sistematizar el proceso de ensayo. Para ello, para cada probeta se ha seguido el siguiente esquema:

1. Numeración de la probeta.
2. Nombramiento de sus caras (a, b, c, d) y sus testas (T y T').
3. Medición de su geometría (longitud, escuadrías).
4. Trazado de las líneas de división de las posiciones de punto medio y de 3 cm de separación de los bordes laterales para el posterior ensayo de flexión según norma UNE 56537:1979.

##### V.2.3.2.1.2. Determinación propiedades físicas

La determinación de las propiedades físicas de las pequeñas probetas se realiza siguiendo los procedimientos descritos para las probetas de tamaño estructural.

*Contenido de humedad:*

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-2:2002.

*Densidad:*

La densidad de cada una de las piezas se ha determinado a partir de la relación entre la masa y el volumen de las mismas, obteniendo la densidad "aparente".

##### V.2.3.2.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos

En cada probeta se realizan mediciones de velocidad de ultrasonidos directas (palpadores enfrentados) en las siguientes direcciones:

- Mediciones longitudinales: mediciones de testa a testa en la dirección paralela a la fibra recorriendo el total de la longitud de la pieza.
- Mediciones normales: mediciones en los cantos de las piezas perpendiculares a los anillos de crecimiento.
- Mediciones tangenciales: mediciones en los cantos de las piezas tangenciales a los anillos de crecimiento.

#### V.2.3.2.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas de las pequeñas probetas, resistencia a flexión estática y módulo de elasticidad longitudinal, se han realizado según el procedimiento experimental descrito en la norma UNE 56537:1979.

##### V.2.3.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ )

En el ensayo de rotura a flexión se aplica una carga puntual en el centro de la pieza simplemente apoyada sobre dos puntos situados a 30 mm de sus extremos (Figura V.25).

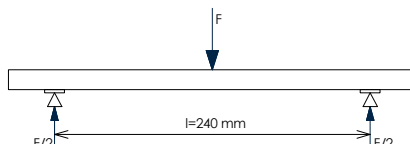


Figura V.25. Dispositivo de ensayo según norma UNE 56537:1979.

Como datos resultantes del ensayo se obtienen la carga de rotura y la flecha. La resistencia a flexión viene dada por la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- $f_m$  Resistencia a la flexión estática en N/mm<sup>2</sup>.
- P Carga de rotura en newtons, N.
- L Longitud de la probeta entre apoyos en milímetros, mm. En este caso 240 mm.
- B Anchura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.
- H Altura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.

Este valor obtenido a partir de la rotura de pequeñas probetas debe corregirse para obtener el valor de resistencia real en piezas de tamaño estructural. La norma UNE 56537 define el factor de corrección **0,7161**, factor por el que debe multiplicarse la resistencia de ensayo para obtener el valor real.

##### V.2.3.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad longitudinal ( $E_L$ )

A partir de estos datos, carga de rotura y flecha, se obtienen la resistencia a flexión estática y el módulo de elasticidad longitudinal aparente

$$E_L = \frac{PL^3}{4fBH^3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- P Carga de rotura en newtons, N.
- f Deformación que produce la carga P antes del límite elástico en milímetros, mm.

Este módulo es corregido multiplicando por un factor de corrección de **1,1333** para tener en cuenta la influencia del esfuerzo cortante y obtener el módulo de elasticidad real  $E_L'$ .

## V.2.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

Los ensayos sobre madera deteriorada se han realizado sobre pequeñas probetas de dimensiones 20x20x300 mm<sup>3</sup>. Estas probetas han sido talladas a partir de vigas de madera deteriorada procedentes de derribo. La imposibilidad de encontrar piezas de gran escuadría con patrones de deterioro uniformes nos lleva a emplear, en este capítulo, pequeñas probetas para, en una segunda fase, correlacionar los resultados obtenidos en los distintos estadios de deterioro con la resistencia residual de las piezas.

### V.2.4.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

La fase de ensayos no destructivos con madera deteriorada comprende la determinación de sus propiedades físicas (pérdida de densidad y contenido de humedad) y la medición de las velocidades de ultrasonidos. En este caso, la detección de distintos estadios de deterioro se realiza a partir de las velocidades normales a la fibra.

#### V.2.4.1.1. Determinación de las propiedades físicas

*Humedad:*

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-2:2002.

*Pérdida de densidad:*

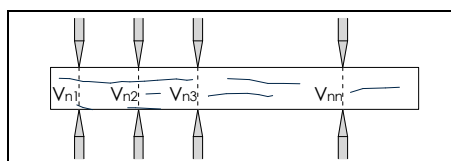
Las pérdidas de densidad de las probetas deterioradas se determinan por comparación. De cada viga se extraen probetas de madera sana (usadas como referencia) y probetas de madera deteriorada y se calcula, en cada caso, su densidad como la relación entre su masa y su volumen. Las pérdidas de densidad son deducidas de la comparación cuantitativa de los valores de densidad obtenidos en las probetas de madera deteriorada con respecto a los valores de densidad de las probetas de madera sana.

#### V.2.4.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos

En cada probeta se realizan mediciones de velocidad de ultrasonidos directas (palpadores enfrentados) en las siguientes direcciones:

- Mediciones longitudinales: mediciones de testa a testa en la dirección paralela a la fibra recorriendo el total de la longitud de la pieza.
- Mediciones normales: mediciones en los cantos de las piezas perpendiculares a los anillos de crecimiento. En las probetas de madera deteriorada se realizan mediciones de la velocidad normal en varias secciones intermedias en toda la longitud de la pieza. La velocidad normal se obtiene como media de todas las mediciones (Figura V.26.).

$$V_{n_m} = \frac{V_{n_1} + V_{n_2} + V_{n_3} + \dots + V_{n_n}}{n}$$



**Figura V.26.** Mediciones de la velocidad normal en las probetas de madera deteriorada.

#### V.2.4.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

La fase de ensayos destructivos con madera deteriorada se centra fundamentalmente en la determinación de la resistencia a flexión de las probetas.

##### V.2.4.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ )

Como en el capítulo anterior, el ensayo de rotura a flexión para pequeñas probetas se realiza aplicando una carga puntual en el centro de la pieza simplemente apoyada sobre dos puntos situados a 3 cm de sus extremos (Figura V.25).

Como datos resultantes del ensayo se obtienen la carga de rotura y la flecha. La resistencia a flexión viene dada por la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$f_m$	Resistencia a la flexión estática en N/mm <sup>2</sup> .
P	Carga de rotura en newtons, N.
L	Longitud de la probeta entre apoyos en milímetros, mm. En este caso 240 mm.
B	Anchura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.
H	Altura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.

Este valor obtenido a partir de la rotura de pequeñas probetas debe corregirse para obtener el valor de resistencia real en piezas de tamaño estructural. La norma UNE 56537 define el factor de corrección **0,7161**, factor por el que debe multiplicarse la resistencia de ensayo para obtener el valor real.





## **V.3. PLAN EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

---

### **V.3.1. EQUIPOS UTILIZADOS**

### **V.3.2. MATERIAL DE ENSAYO**

### **V.3.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA**

#### **V.3.3.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS**

#### **V.3.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS**

### **V.3.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA**

## RESUMEN

La fase experimental de este capítulo tiene como objetivo obtener las correlaciones entre la densidad aparente de la madera de coníferas (pino) y las medidas de resistógrafo. La finalidad es proponer, a partir de la aplicación de dichas correlaciones, una metodología para determinar la densidad de los elementos que constituyen las estructuras de madera en servicio. Con este objetivo esta fase experimental se desarrolla a partir de la metodología referida a continuación:

- Realización de las medidas de resistógrafo.
- Determinación de las propiedades físicas (densidad) de las secciones de ensayo de las probetas.
- Correlación entre los ensayos de densidad y las medidas de resistógrafo.

La densidad es una propiedad física de la madera que interviene directamente sobre sus propiedades mecánicas. A partir de la densidad y la velocidad longitudinal de ultrasonidos es posible conocer el módulo de elasticidad dinámico de una madera, fuertemente relacionado con su elasticidad real. Asimismo, la norma UNE EN 384:2010 utiliza la densidad, junto con el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión, como variable clasificatoria.

En una segunda fase del capítulo se pretende cuantificar la pérdida de densidad de un elemento de madera deteriorado a partir de su perfil resistográfico.

### V.3.1. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados en este capítulo han sido cedidos por el Departamento de Maderas del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) de Portugal durante el periodo de estancia realizado en los meses de Julio a Septiembre de 2011.

#### V.3.1.1. Resistógrafo

Para determinar la densidad de la madera se emplea un resistógrafo de la marca alemana IML, modelo Resistograph 1280, línea B (Figura V.27. a.). Este equipo cuenta con una aguja de 1,5 mm de diámetro y un cabezal de penetración de 3 mm. El equipo permite 7 velocidades de avance de la aguja (desde 60 mm/min hasta 500 mm/min) y una profundidad máxima de penetración de 280 mm. La velocidad empleada en los ensayos realizados es la Velocidad 3, correspondiente a 150 mm/min. El resistógrafo registra la resistencia que ofrece la madera a la perforación mediante la grabación de la potencia consumida durante el proceso. Esta potencia es interpretada en términos de variación de densidad, suponiendo que a mayor densidad mayor será la resistencia al paso de la aguja.

El registro de datos se realiza con 3 niveles de amplitud mediante 2 sistemas:

- Gráficamente, a través de una pequeña impresora incorporada en el equipo, que reproduce los datos obtenidos durante el ensayo (Figura V.27. b.).
- Mediante una memoria interna del equipo que almacena los datos para su posterior volcado en el ordenador. La memoria almacena 35 medidas por cada milímetro penetrado.



**Figura V.27.** a. Resistógrafo empleado en los ensayos. b. Impresora que reproduce los datos durante el ensayo.

#### V.3.1.2. Equipos auxiliares

*Higrómetro:*

Las determinaciones del contenido de humedad se han realizado con un higrómetro digital de la marca DOSER, modelo DM4A. Este medidor de humedad se utiliza para madera, materiales de construcción, papel, aislantes y otros materiales. Su rango de medición es de 0-100% (ajustable) con una resolución de 0,1% y una capacidad de almacenaje de 100 valores. El alcance de la medida en profundidad es aproximadamente de 3 cm.

*Estufa de secado:*

El secado de las probetas se ha realizado en una estufa de la marca ARALAB, modelo FITOCLIMA 8 000 ECP 45. Se trata de una cámara climática con una capacidad de 8000 litros empleada para objetos de grandes dimensiones. Su rango de temperatura oscila entre -50°C y +180°C y una humedad de 10 a 98%.

### Balanza 1:

Para medir la masa de las probetas se utiliza una balanza electrónica de la marca PIONEER. La capacidad de carga de esta balanza es de 4100 g con un rango de precisión 0,01 g.

### Balanza 2:

Para medir el volumen de las probetas se utiliza una balanza de la marca ADAM, modelo ACH-30. La capacidad de carga de la balanza es 30 Kg con divisiones en 1 g.

## V.3.2. MATERIAL DE ENSAYO

### V.3.2.1. Madera sana

Para evaluar la sensibilidad del resistógrafo como medidor de densidad se han realizado ensayos sobre 55 piezas de madera sana de coníferas. Se trata de troncos de diferentes pinos sin deterioro y con diámetros y alturas variables. Los diámetros de las piezas oscilan entre 10 y 20 cm con alturas comprendidas entre 40 y 80 cm (Figura V.28). Este tipo de piezas fueron empleadas en la mejora de terreno de las cimentaciones de los edificios durante la reconstrucción de Lisboa tras el terremoto de 1755. Particularmente, las piezas utilizadas en estos ensayos proceden de las cimentaciones del Banco de Portugal. La humedad de todas las probetas en el momento de ensayo era inferior a 18%.



**Figura V.28.** Probetas de madera sana para ensayo.

### V.3.2.2. Madera deteriorada

Se seleccionan 5 vigas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) procedentes de un forjado de entrevigado cuajado de una obra de rehabilitación situada en la calle Lineros nº 11, del centro de Sevilla. Las vigas tienen una escuadría de 12x18 cm y una longitud de 4 m aproximadamente. Su contenido de humedad en el momento de ensayo es inferior al 18%.

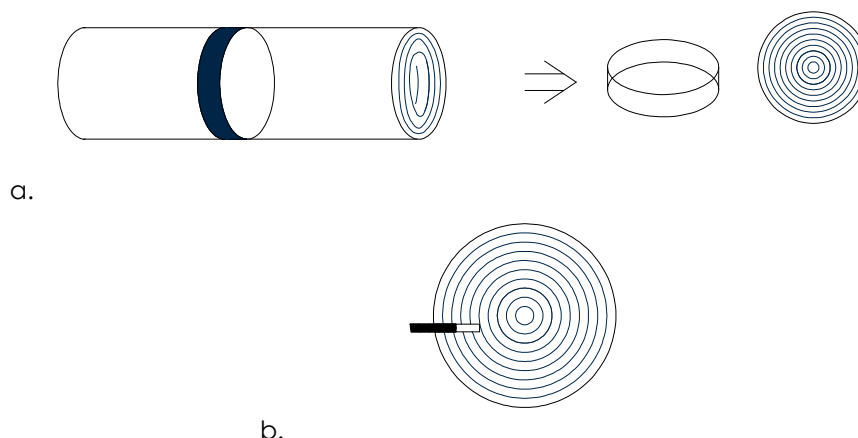


**Figura V.29.** Vigas de madera deteriorada desmontadas para ensayo.

### V.3.3. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

El objetivo perseguido en este capítulo es relacionar la medida del resistógrafo con la densidad de la madera. Para alcanzar este objetivo los ensayos se han desarrollado empleando 2 tipos de probetas (Figura V.30.):

- Secciones completas de madera sana extraídas de los troncos de madera.
- Pequeñas muestras extraídas de las proximidades de las secciones anteriores.



**Figura V.30.** a. Sección completa para ensayo seleccionada dentro de cada tronco. b. Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en las proximidades de una sección de ensayo.

#### V.3.3.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS

El procedimiento experimental sobre las secciones completas de madera sana extraídas de los troncos iniciales se ha planteado en las siguientes fases:

1. Determinación del contenido de humedad de los troncos completos descartando aquellas piezas con un contenido de humedad superior al 18%. Humedades superiores al 18% impiden aplicar la corrección establecida por la norma UNE EN 384:2010 que permite referir los resultados de los ensayos que varían en función del contenido de humedad a un contenido de humedad único.
2. Selección de la sección del tronco para desarrollar los ensayos. Sobre esta sección se realizan los ensayos de resistógrafo.
3. Determinación de la densidad de la sección escogida.
4. Determinación del contenido de humedad exacto de la sección ensayada mediante secado en estufa.

##### V.3.3.1.1. Determinación del contenido de humedad de los troncos completos

Antes de iniciar los ensayos se ha determinado el contenido de humedad de los troncos completos mediante higrómetro. El requerimiento es que la humedad de estos no sea en ningún caso superior al 18%. De este modo, los resultados obtenidos en los ensayos posteriores pueden ser corregidos y referidos a un contenido de humedad de 12% según las especificaciones de la norma UNE EN 384:2010. Las piezas que no cumplen con ese requisito son introducidas en la estufa para su secado a una temperatura constante de  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### V.3.3.1.2. Realización de las medidas de resistógrafo, RM

Tras comprobar que el contenido de humedad de los troncos es inferior al 18%, se ha seleccionado en cada uno de ellos una sección libre de defectos y deterioro. Sobre esta sección se marcan 2 perpendiculares entre sí (Figura V.31) sobre los que se realizan las medidas de resistógrafo, RM. La velocidad de penetración de la aguja en estos ensayos es de 150 mm/min. Estas medidas son tomadas como representación de cada pieza.

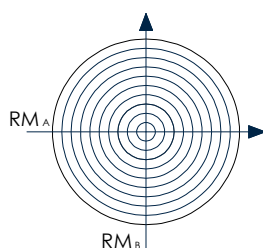


Figura V.31. Medidas de resistógrafo perpendiculares realizadas en cada sección.

Los valores  $RM_A$  y  $RM_B$  se obtienen a partir de los perfiles resistográficos originados en cada ensayo (Figura V.32) y representa la resistencia que ofrece la madera a la perforación a través de la potencia consumida por el resistógrafo durante el proceso. Así, la variabilidad que se refleja en un perfil resistográfico de madera sana corresponde con la diferencia de densidades entre la madera de primavera y de verano coincidiendo el ancho de los picos con el ancho de los anillos de crecimiento de la madera.

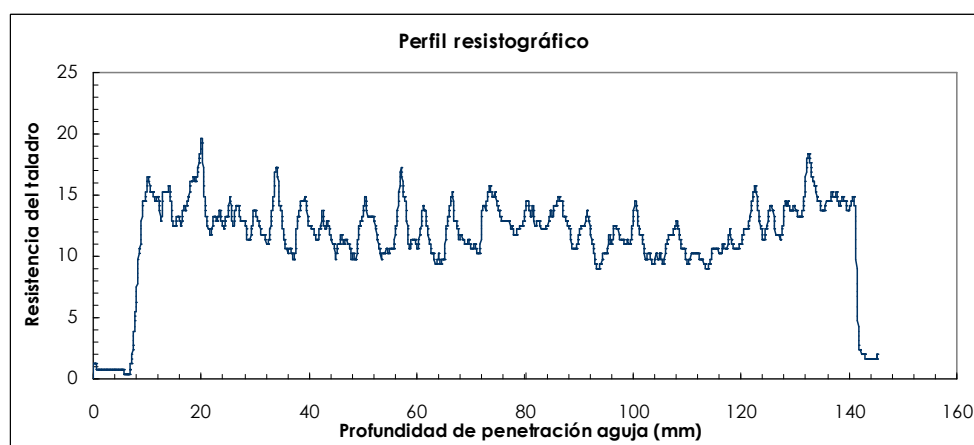


Figura V.32. Perfil resistográfico,  $RM_A$  o  $RM_B$ , de una probeta.

El valor de RM se calcula como el área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada y mide el consumo medio del equipo por milímetro penetrado. Este valor puede expresarse como:

$$RM = \frac{\int_0^I \text{Área}}{I}$$

siendo;

$\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevado a la segunda potencia,  $\text{mm}^2$ .

$I$  Longitud total penetrada en milímetros, mm.

### V.3.3.1.3. Determinación de las propiedades físicas

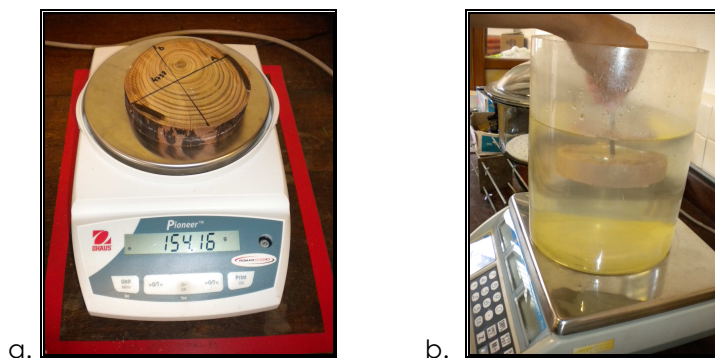
#### Densidad:

Tras realizar las perforaciones con el resistógrafo, se ha extraído de cada tronco la sección ensayada. Sobre estas secciones se señalan los ejes que han sido perforados con el resistógrafo (Figura V.33).



**Figura V.33.** Secciones sobre las que se han realizado los ensayos con el resistógrafo. Las líneas rotuladas marcan cada uno de los ejes de perforación.

La determinación de la densidad de cada sección se realiza según el procedimiento descrito en la norma ASTM D2395-07ae1 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials). Para ello se mide la masa en cada caso (Figura V.34.a.) y se determina su volumen a partir del empuje experimentado al sumergir cada una de las piezas en agua, previa impermeabilización mediante film de polietileno (Figura V.34.b.).



**Figura V.34.** a. Medición de la masa de cada sección. b. Medición del volumen mediante el empuje experimentado.

#### Humedad:

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 13183-1:2002. Para ello se introducen las probetas en la estufa a una temperatura constante de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  para su desecación hasta alcanzar el estado anhidro. El contenido de humedad de la probeta se determina por diferencia de masas:

$$h(\%) = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100$$

siendo:

$m_w$  Masa inicial de la probeta (con humedad) en gramos, g.  
 $m_0$  Masa de la probeta tras la desecación (estado anhidro) en gramos, g.



### V.3.3.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS

En una segunda fase, se lleva a cabo un procedimiento de ensayo similar sobre pequeñas probetas de 7 mm de diámetro y longitud variable. Estas probetas son extraídas en las proximidades de las secciones de ensayo anteriores (Figura V.35).

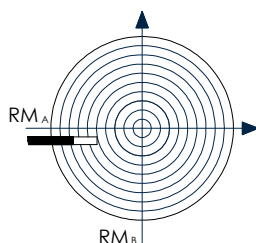


**Figura V.35.** Pequeñas muestras extraídas en las proximidades de las secciones anteriores.

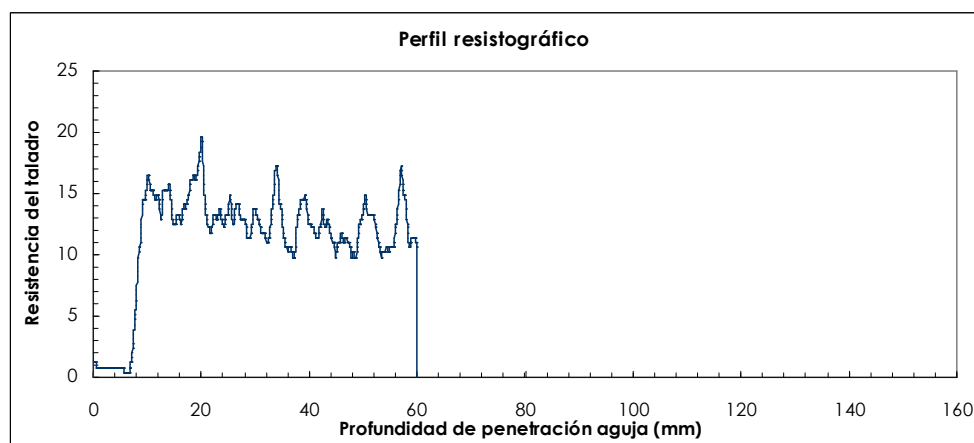
Este tipo de muestras se emplean habitualmente para identificar la especie de una madera y para determinar la densidad y contenido de humedad de la madera de una estructura en una obra de rehabilitación.

#### V.3.3.2.1. Determinación de las medidas de resistógrafo, RM

La extracción de las pequeñas probetas se realiza siguiendo la dirección de uno de los ejes de perforación (Figura V.36). De este modo, para determinar la medida de resistógrafo se selecciona el tramo del perfil resistográfico que se corresponde con la longitud de la probeta (Figura V.37).



**Figura V.36.** Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en las proximidades de una sección de ensayo y siguiendo una dirección de los ejes de perforación.



**Figura V.37.** Perfil resistográfico,  $RM_A$  o  $RM_B$  de una probeta de 51 mm de longitud (a los 60 mm de profundidad hay que descontar el recorrido de la aguja hasta que penetra en la madera, en este caso, 9 mm aproximadamente).



Análogamente, el valor de la medida de resistógrafo, RM, se obtiene como el área bajo la curva resistográfica correspondiente por unidad de longitud. Este valor mide el consumo medio del equipo por milímetro penetrado, que a su vez se corresponde con la longitud de la probeta. Este valor puede expresarse como:

$$RM = \frac{\int_0^l \text{Área}}{l}$$

siendo;

- $\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevados a la segunda potencia, mm<sup>2</sup>.  
 $l$  Longitud total penetrada en milímetros, mm, que corresponde, en este caso, a la longitud de cada una de las pequeñas probetas.

#### **V.3.3.2.2. Determinación de las propiedades físicas**

*Densidad:*

La densidad de las pequeñas probetas se ha obtenido a partir de la relación de la masa y el volumen, calculado éste como el volumen de un cilindro (dimensiones medidas mediante pie de rey).

*Humedad:*

La humedad de las pequeñas probetas se determina siguiendo el procedimiento descrito. Se introducen las probetas en la estufa para su desecación hasta el estado anhidro y se obtiene su contenido de humedad por diferencia de masas antes y después de la desecación.

**Nota:** Todo el procedimiento experimental referido en este apartado para las pequeñas probetas se repite tomando, en este caso, probetas de 20 mm de longitud. Estas probetas de 20 mm son extraídas a partir de las pequeñas probetas descritas.

En este caso, las medidas de resistógrafo son calculadas a partir del área del perfil resistográfico correspondiente a una longitud de 20 mm. La determinación de las propiedades físicas (densidad y contenido de humedad) sigue el procedimiento descrito.

El objetivo de estos ensayos es acotar la probeta mínima necesaria a extraer de una estructura para determinar la densidad de la misma. A partir de los resultados en estos ensayos se pretende desarrollar una metodología de aplicación en obra para la obtención in situ de la densidad de una estructura en servicio en una obra de rehabilitación.

### V.3.4. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

Sobre la madera deteriorada se pretende cuantificar mediante ensayos de resistógrafo la pérdida de densidad producida en un elemento además de localizar la zona donde se ha producido el deterioro. Para ello se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

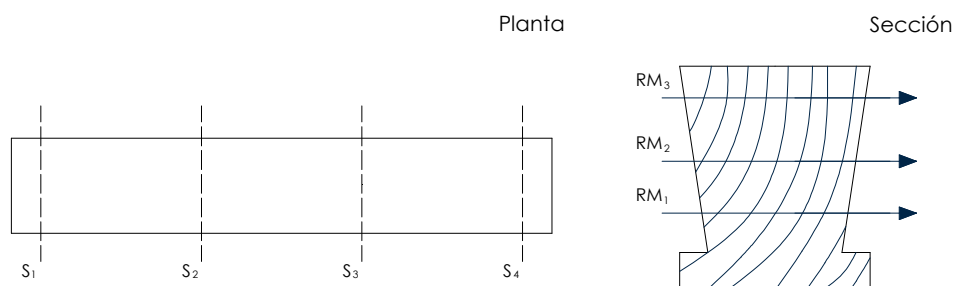
1. Determinación del contenido de humedad de las secciones a ensayar.
2. Realización de las medidas con el resistógrafo. En cada sección se realizan 3 mediciones perpendiculares a la fibra.
3. Determinación de la pérdida de densidad de la sección escogida.

#### V.3.4.1. Determinación del contenido de humedad de las vigas

Antes de iniciar los ensayos se ha determinado el contenido de humedad de cada una de las secciones de las vigas a ensayar. El valor obtenido no debe ser en ningún caso superior al 18%. De este modo, los resultados obtenidos en los ensayos posteriores pueden ser corregidos y referidos a un contenido de humedad de 12% según la UNE EN 384:2010.

#### V.3.4.2. Realización de las medidas de resistógrafo, RM

En cada viga se seleccionan 4 secciones de ensayo. A su vez, sobre cada sección se realizan 3 medidas de resistógrafo a distintas alturas de la sección (Figura V.38). La velocidad de penetración de la aguja en estos ensayos es de 150 mm/min.



**Figura V.38.** a. Selección de las secciones de ensayo dentro de cada viga. b. Selección de las alturas de ensayo dentro de cada sección.

El valor de las medidas de resistógrafo, RM, se ha determinado según el procedimiento descrito en el Capítulo V.3.3.1.2. A partir del perfil resistográfico obtenido en cada caso se calcula el área bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada. De este modo se mide el consumo medio del equipo por milímetro penetrado.



**Figura V.39.** Realización de las medidas de resistógrafo sobre las vigas de madera deteriorada.

#### **V.3.4.3. Determinación de la pérdida de densidad**

Dada la dificultad de obtener experimentalmente la pérdida de densidad de cada sección sobre las que se realizan las medidas de resistógrafo, se decide obtener esta pérdida de densidad a partir de las correlaciones extraídas en el presente trabajo de investigación.

Los ensayos realizados en el Capítulo V.2.4. permiten obtener la relación entre la pérdida de densidad de la madera y las velocidades de transmisión de ultrasonidos perpendiculares a la fibra de las piezas. Estas correlaciones son extraídas a partir de pequeñas piezas de 20x20x300 con una pérdida de densidad uniforme. De este modo, a partir de mediciones de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la fibra es posible obtener la pérdida de densidad de un elemento.

Sobre cada sección seleccionada para realizar las medidas de resistógrafo (Figura V.38) se toman previamente las medidas de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la fibra de las vigas (Figura V.40).



**Figura V.40.** Realización de las medidas de ultrasonidos sobre las secciones ensayadas con resistógrafo.

Estas mediciones permiten obtener la pérdida de densidad según la siguiente expresión:

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N^{19}$$

siendo,

$\Delta d$  Pérdida de densidad en porcentaje, %.

$V_N$  Velocidad de ultrasonidos perpendicular a la fibra en m/s.

---

<sup>19</sup> El procedimiento de obtención de esta regresión se detalla en el Capítulo VI.2.2



## **V.4. PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS**

---

V.4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

V.4.2. EQUIPOS UTILIZADOS. FABRICACION DE UN NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS

V.4.3. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO PALPADOR. CORRELACIÓN ENTRE PALPADORES DE ULTRASONIDOS

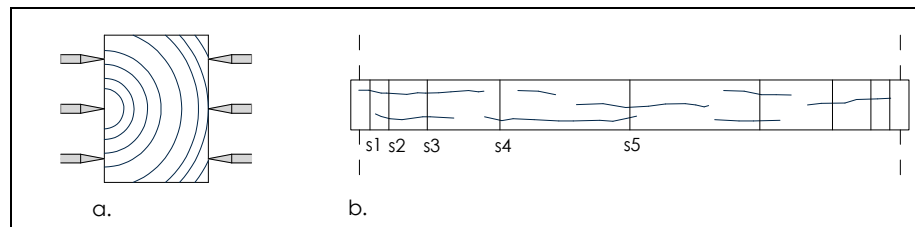
#### RESUMEN

El objetivo fundamental de este capítulo es desarrollar un método para la inspección de forjados de entrevigado cuajado mediante la técnica de ultrasonidos. Para ello se plantea:

- Análisis de la técnica de ultrasonidos actual.
- Adaptación de la técnica a esta tipología constructiva mediante la construcción de un nuevo transductor.
- Desarrollo de una metodología de inspección.

#### V.4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se ha descrito en el Estado del Conocimiento, la tipología constructiva de forjados de entrevigado cuajado está caracterizada por tener las caras laterales de sus vigas ocultas, quedando tan solo accesible su cara inferior. Esta situación implica que la técnica de ultrasonidos empleada para la inspección de forjados resulte inaplicable (Figura V.41).



**Figura V.41.** Metodología de ultrasonidos aplicada a la inspección de forjados (a. Medidas realizadas en cada sección, b. Selección de secciones en las vigas).

La técnica de ultrasonidos aplicada al diagnóstico de forjados de madera está basada, como se ilustra en la Figura V.41, en la medición de las velocidades normales de transmisión ultrasónica en los cantos de distintas secciones de las vigas. Así, a partir de los valores de velocidad obtenidos es posible deducir:

- En madera sana: A partir de la velocidad longitudinal, es posible obtener el módulo de elasticidad dinámico a partir del cual se puede deducir el módulo de elasticidad estático y estimar la resistencia, obteniendo, de este modo, su clasificación resistente.
- En madera deteriorada: A partir de las velocidades normales (perpendiculares a la fibra), es posible estimar las pérdidas de densidad de las piezas, debidas a ataques por insectos xilófagos o pudriciones, y relacionarlas con su capacidad resistente residual.

De este modo, la técnica de ultrasonidos se presenta como un método de inspección de gran utilidad para la evaluación de la capacidad resistente de una estructura en servicio.

No obstante, a pesar de su utilidad, las metodologías que se han desarrollado hasta ahora y la morfología de los equipos de ultrasonidos actuales impiden su puesta en práctica en la tipología constructiva de forjados de entrevigado cuajado. Es por esto que, desde el presente trabajo de investigación, se plantea desarrollar, a partir de ensayos con ultrasonidos, una nueva metodología, contemplando para ello la adaptación de los equipos existentes a este nuevo campo de inspección.

Los objetivos que se plantean pretenden:

1º) A través de las velocidades longitudinales, estimar la resistencia de la madera empleada.

2º) A partir de las velocidades normales, diagnosticar el avance del deterioro de las vigas para determinar la sección residual resultante que trabaja a flexión.

Finalmente, con los datos, sección residual y resistencia, recalcular el forjado y determinar las vigas/pares que necesitan ser sustituidos.

#### V.4.2. EQUIPOS UTILIZADOS. FABRICACION DE UN NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS

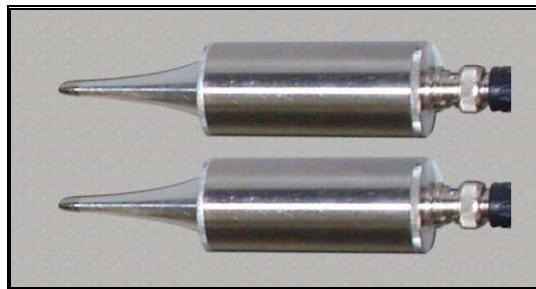
Los equipos de ultrasonidos son dispositivos que generan una onda ultrasónica a partir de un elemento primario, en contacto con el medio. Este elemento, llamado transductor, convierte una energía dada (en nuestro equipo, eléctrica) en otra de tipo mecánico que se propaga a través del medio en forma de onda con una frecuencia característica en el rango ultrasónico.

La morfología de estos equipos no es única sino que puede variar en función de las características del material a inspeccionar:

- Hormigón: Para la inspección de estructuras de hormigón se utilizan los llamados transductores cilíndricos. Con estos transductores el contacto con el elemento a inspeccionar se produce a través de una superficie plana optimizado, además, por el uso de geles acoplantes.
- Madera: Tradicionalmente, para la inspección de estructuras de madera se han empleado los tradicionales transductores cilíndricos utilizados en hormigón mejorando su eficacia con materiales acoplantes. Investigaciones precedentes<sup>1</sup> estudiaron la transmisión de ultrasonidos en la madera a partir de los palpadores cilíndricos y el efecto producido por distintos materiales acoplantes. Los resultados de estos estudios concluyeron que el mejor material acoplante era la grasa.

Hoy día, el problema de acoplamiento de los palpadores para la inspección de estructuras de madera queda resuelto mediante el empleo de los palpadores cónicos. Con estos palpadores el contacto con la pieza es puntual.

Para el desarrollo de este capítulo se ha empleado un juego de palpadores cónicos del equipo de ultrasonidos de la marca Krautkrämer modelo BP V. Este aparato nos da la lectura del tiempo de retardo desde que la onda sale del palpador emisor hasta que es recibida por el palpador receptor. Para ello posee una pantalla de cristal líquido de cinco dígitos, en la que se muestra la lectura de tiempo en microsegundos con una precisión de  $\pm 0,1 \mu s$ . Los palpadores contienen puntas de cristales piezoeléctricos de circonato de plomo-titanio y 6 mm de diámetro, y van conectados al aparato mediante dos cables coaxiales. Su frecuencia de emisión es de 50 KHz (Figura V.42).



**Figura V.42.** Palpadores de ultrasonidos cónicos empleados para la fabricación del nuevo transductor.

Con estos transductores, el procedimiento operatorio seguido para la inspección de estructuras de madera sigue uno de los siguientes criterios de medición (Figura V.43):

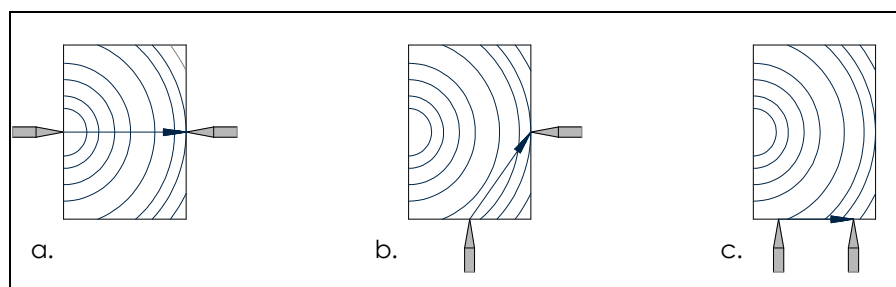
- Transmisión directa: los palpadores de ultrasonidos deben situarse enfrentados. Situando los palpadores en las testas de las piezas puede obtenerse la velocidad de ultrasonidos longitudinal, necesaria para calcular el módulo de elasticidad dinámico. Asimismo, situando los palpadores en los cantos de las piezas se obtienen las velocidades

<sup>1</sup> Kamioka H. "Effects of Ultrasonic Bonding Material on Velocity and Attenuation of Sound in Red Lauan Wood". *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. XXVII. Nº 2 (1988). pp. 188-191.



transversales, a partir de las cuales es posible detectar las pérdidas de densidad.

- Transmisión semidirecta e indirecta: los palpadores de ultrasonidos se sitúan no enfrentados.



**Figura V.43.** Procedimientos de medición con ultrasonidos (a. Transmisión directa, b. Transmisión semidirecta, c. Transmisión indirecta).

Dada la morfología de la tipología constructiva del tipo de forjados que se pretende inspeccionar, el único procedimiento operatorio viable es la transmisión indirecta. Sin embargo, la bibliografía consultada apunta a que las medidas más eficaces para la inspección de estructuras de madera son:

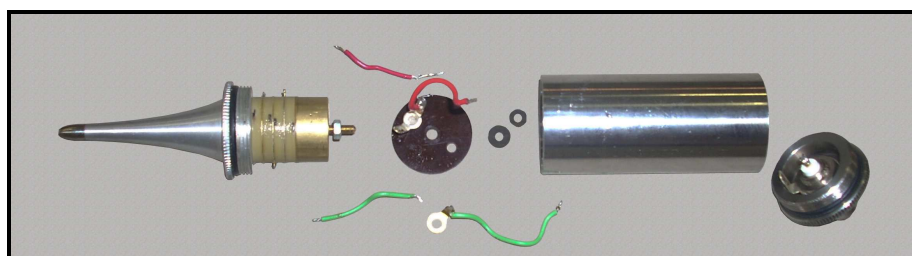
- Para la estimación del módulo de elasticidad dinámico: medidas longitudinales directas de testa a testa de la pieza<sup>2</sup>.
- Para detectar pérdidas de densidad: medidas transversales<sup>3</sup>.

Por todo esto, resulta evidente la necesidad de desarrollar un nuevo palpador de ultrasonidos que permita realizar mediciones con los palpadores enfrentados.

#### *Fabricación de un nuevo palpador de ultrasonidos*

El análisis del procedimiento operatorio de otros equipos como el resistógrafo, el penetrómetro o el arrancador de tornillos, en los que se practica un orificio en la pieza para verificar su estado interior nos lleva a plantear un dispositivo en el que se aúnen la metodología de ensayo de los ultrasonidos y el procedimiento operatorio de otros equipos. Para ello se sigue el siguiente procedimiento:

1º) Desmonte del palpador de ultrasonidos tradicional (Figura V.44).



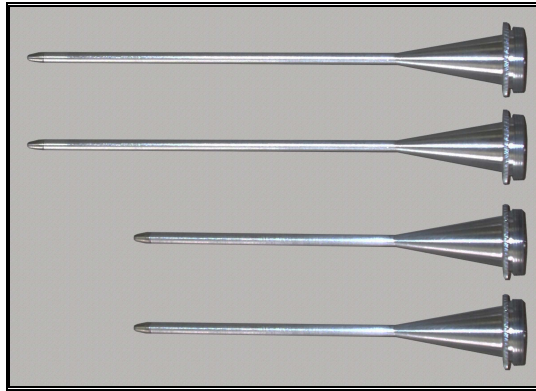
**Figura V.44.** Palpador tradicional de ultrasonidos desmontado para la fabricación del nuevo palpador.

<sup>2</sup> Arriaga, F., Peraza, F., Esteban M., Bobadilla, I., García, F. "Intervención en estructuras de madera". ATIM (2002). 464 págs. ISBN: 84-873-8124-3.

<sup>3</sup> Rubio de Hita, P. "Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

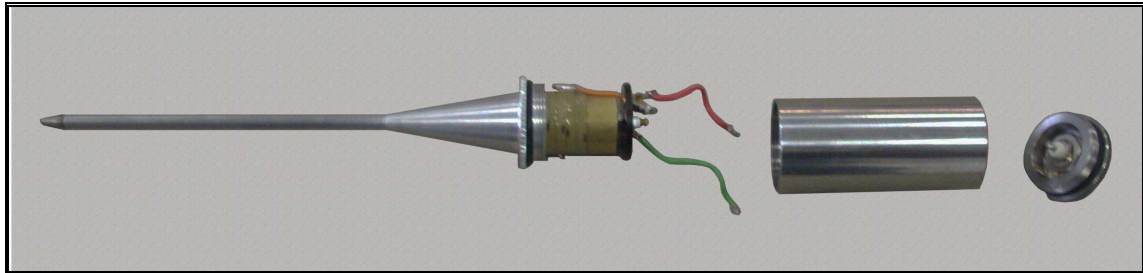
## PLAN EXPERIMENTAL

2º) Fabricación de nuevos cabezales de circonato de plomo titanio. Se manejan dos longitudes: 9 y 15 cm (Figura V.45).



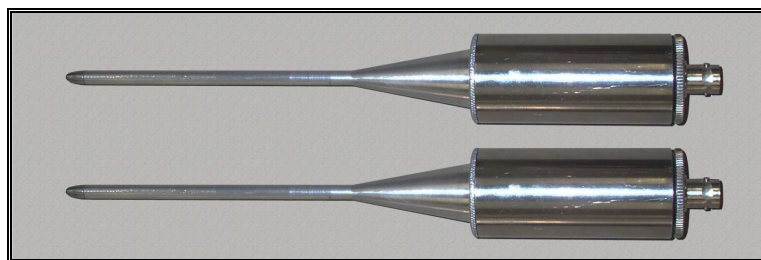
**Figura V.45.** Fabricación de cabezales para el nuevo palpador. Se manejan dos longitudes: 9 cm y 15 cm.

3º) Proceso de montaje del nuevo cabezal con el mecanismo de un palpador de ultrasonidos tradicional (Figura V.46).



**Figura V.46.** Proceso de montaje del nuevo palpador.

4º) Nuevo palpador. Finalmente, para que el margen de aplicación de este palpador sea más amplio se decide realizar el montaje con el cabezal de 15 cm (Figura V.47).



**Figura V.47.** Nuevo palpador con el cabezal de 15 cm.

Una vez desarrollado este nuevo palpador se han realizado distintos ensayos en laboratorio con dos objetivos fundamentales:

1º) Verificar su funcionamiento.

2º) Correlacionar los resultados obtenidos con este nuevo palpador con los resultados obtenidos con el palpador tradicional.

### **V.4.3. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO PALPADOR. CORRELACIÓN ENTRE PALPADORES DE ULTRASONIDOS**

Los ensayos realizados con el nuevo palpador tratan de verificar su funcionamiento y establecer las correlaciones necesarias para poder referir los resultados de los ensayos con este nuevo transductor con los resultados ya obtenidos con el palpador tradicional.

Para estudiar la correlación existente entre ambos palpadores se han realizado dos tipos de mediciones, desde el exterior de las piezas e interiores, perforando las vigas e introduciendo el nuevo cabezal del palpador. De esta manera se busca simular las condiciones de inspección reales.

#### **V.4.3.1. Mediciones exteriores**

Desde el exterior de las piezas se han realizado medidas longitudinales y perpendiculares (normales) a la fibra. En esta primera fase se trata de obtener la correlación entre ambos palpadores teniendo como único punto de contacto con las piezas la punta de los transductores.

##### **▪ Mediciones longitudinales**

*Material de ensayo:*

Para verificar la correspondencia entre las medidas longitudinales se han empleado probetas de distintas dimensiones:

- 2 probetas de 30 cm,
- 2 probetas de 50 cm,
- 3 probetas de 100 cm,
- 1 probeta de 120 cm.

*Procedimiento de ensayo:*

En cada una de las probetas se han realizado medidas de transmisión directa en la dirección longitudinal de las piezas. Estas medidas han sido realizadas con los dos palpadores de ultrasonidos, el palpador tradicional (con el cabezal corto) y el nuevo palpador (con el cabezal de 15 cm).

##### **▪ Mediciones normales**

*Material de ensayo:*

Para las medidas perpendiculares (normales) a la fibra se ha tomado una única probeta de 11 cm de ancho.

*Procedimiento de ensayo:*

En la probeta mencionada se han marcado varias secciones. En cada una de las secciones se han marcado distintas alturas para llevar a cabo varias mediciones en cada sección. Como en el caso anterior, cada medición es realizada con los dos palpadores para contrastar los resultados.

#### **V.4.3.2. Mediciones interiores**

Una vez verificado el funcionamiento del nuevo dispositivo, en una segunda fase, se trata de determinar si se producen distorsiones en las mediciones al producirse el contacto del fuste del nuevo palpador con la madera. Asimismo, para las medidas de transmisión internas, se trata de determinar la influencia de la distancia entre palpadores en las mediciones longitudinales y perpendiculares a la fibra.

- **Determinación del grado de transmisión por fuste**

*Material de ensayo:*

Se ha preparado una viga en la que se han seleccionado varias secciones (A, B, C, D). En cada una de estas secciones se han señalado distintas alturas (3 cm, 9 cm y 15 cm) (Figuras V.48 y V.49) para los ensayos posteriores.



**Figura V.48.** Secciones A, B, C y D marcadas sobre la viga tipo.



**Figura V.49.** Distintas alturas marcadas sobre cada sección.

*Procedimiento operatorio:*

En cada uno de los puntos marcados en cada sección se han realizado dos mediciones con el nuevo palpador: desde el interior perforando con un taladro de 0,6 cm de diámetro y desde el exterior en las intersecciones marcadas. Tras realizar estas mediciones se ha aumentado la profundidad de perforación hasta los 9 cm y, análogamente, se han ejecutado las dos mediciones. Finalmente, se ha perforado hasta una profundidad última de 15 cm y se ha medido nuevamente la velocidad de transmisión a esta profundidad. Las mediciones obtenidas desde el interior han sido comparadas con los resultados obtenidos desde el exterior.



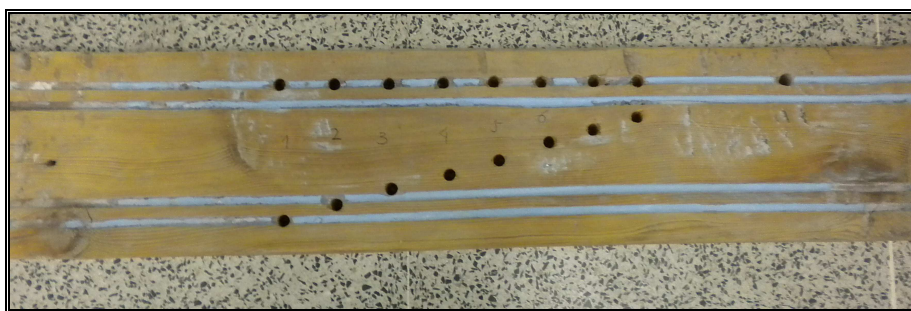
- **Influencia de la distancia entre palpadores en las mediciones**

*Material de ensayo:*

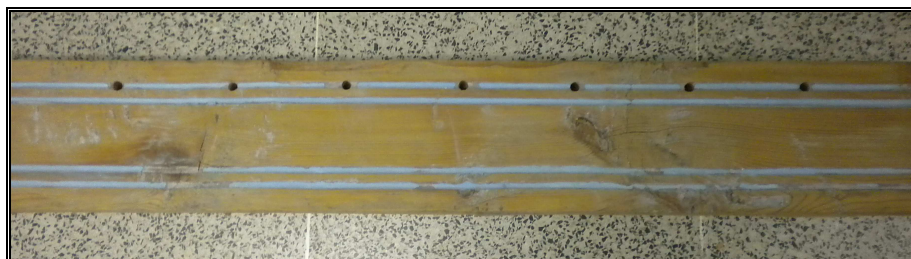
Se han preparado dos vigas en la que se han marcado, en distintas secciones, taladros con distintas separaciones, tanto en la dirección longitudinal como perpendicular a la fibra (Figuras V.50, V.51, V.52).



**Figura V.50.** Separación de taladros variable en la dirección normal. Viga 1.



**Figura V.51.** Separación de taladros variable en la dirección normal. Viga 2.



**Figura V.52.** Separación de taladros variable en la dirección longitudinal. Viga 2.

*Procedimiento operatorio:*

En este caso las mediciones de velocidades han sido realizadas exclusivamente desde el interior. Para ello se ha disminuido paulatinamente la distancia de separación entre transductores comprobando si existe una distancia mínima, en la dirección normal o longitudinal, a la que se producen distorsiones.



## **V.5. PLAN EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS**

---

V.5.1. ELECCIÓN DE MATERIALES

V.5.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS REFUERZOS

V.5.3. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO REFORZADAS

V.5.4. ENSAYOS REALIZADOS

## RESUMEN

Tras el proceso de inspección, el objetivo es aproximarnos al desarrollo de una solución para la reparación y/o refuerzo de vigas de madera. Se pretende desarrollar una solución constructiva que cumpla las exigencias de eficacia estructural, facilidad de ejecución, durabilidad, compatibilidad con la madera, economía, integración estética (impacto visual sobre la estructura) y buen comportamiento al fuego. Asimismo, se persigue desarrollar una solución constructiva viable tanto para el refuerzo de cabezas, deterioradas por ataques de hongos e insectos xilófagos, como para el refuerzo de vanos, necesario por agotamiento del material o cambios de uso.

El estudio de las soluciones actuales pone de manifiesto la necesidad de estudiar un sistema alternativo a las soluciones de reparación y/o refuerzo mediante perfiles metálicos (problemas de corrosión y resistencia al fuego) o a base de madera (baja eficacia estructural). En este sentido, los refuerzos compuestos (fibra de vidrio y resina epoxi) se presentan como una alternativa posible. No obstante, la falta de información sobre su funcionamiento provoca inseguridad en su aplicación. Por esta razón, desde el presente trabajo se propone iniciar un estudio que permita avanzar sobre su comportamiento estructural.



### V.5.1. ELECCIÓN DE MATERIALES

La elección de los materiales a emplear en una solución constructiva debe atender a las exigencias técnicas requeridas y a otros condicionantes. La compatibilidad entre materiales, su coste o razones estéticas pueden cuestionar la idoneidad y/o viabilidad de una determinada solución constructiva.

Desde el presente trabajo de investigación se pretende estudiar un sistema constructivo destinado a la reparación y/o refuerzo de vigas de madera. Para su ejecución, la elección de materiales atiende a los siguientes objetivos:

1. Resistencia. Estructuralmente este sistema debe absorber esfuerzos de cortante o flexión, en función de su posición dentro de la viga.
2. Durabilidad. No atacable por la humedad o por insectos xilófagos y/u hongos.
3. Compatibilidad con la madera.
4. Facilidad de ejecución.
5. Estética. Integración estética de la solución dentro de la estructura.
6. Economía.

De esta forma se han seleccionado:

- *Material soporte*: Se ha empleado un producto natural, el corcho. Se utilizan láminas de corcho de 594 x 841 mm y 1,5 mm de espesor. El corcho es un material compatible con la madera, imputrescible y barato, cuya apariencia contribuye a la integración estética del refuerzo.

El corcho se extrae del tronco y ramas del alcornoque. Está compuesto por células poliédricas, vacías en su interior por lo que el 80% de su volumen es gas, sobre todo nitrógeno. Químicamente, su composición es la siguiente<sup>4</sup>:

- Suberina (45%): Sus principales componentes son los ácidos grasos, alcoholes y oxiácidos. La suberina le confiere el carácter hidrófobo a la célula del corcho, además de protegerla de patógenos externos y evitar la evaporación de agua.
- Lignina (27%): Es un polímero compuesto por alcoholes aromáticos, cuya misión es dar rigidez e impermeabilidad a la membrana celular.
- Celulosa y polisacáridos (12%): La celulosa forma microfibrillas rígidas que permiten al corcho obtener resistencia frente al estiramiento.
- Taninos (6%): Son sustancias polifenólicas, se unen a las proteínas volviéndolas insolubles e imputrescibles, por ello *el corcho no se corrompe y es imputrescible*.
- Ceroides (5%): Son ácidos grasos, que hacen que sea impermeable.
- Otros constituyentes (6%): Materias minerales (sodio, potasio, magnesio, aluminio, hierro, manganeso, silicio, fósforo, bario, estroncio y trazas de litio, cobre, cromo y titanio), agua (representa entre el 3 y el 10 %) y glicerina (su porcentaje varía con la edad del árbol).

Esta constitución le proporciona las siguientes propiedades físicas:

- Densidad: La densidad del corcho está entre 0,12 y 0,25 Kg/dm<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> <http://www.asecor.com/corcho.php?lang=es&sec=2>

- Impermeabilidad: El corcho es casi impermeable gracias a la suberina y la cera que contiene, aunque se trata de una impermeabilidad no absoluta ya que deja fluir lentamente el gas.
  - Compresibilidad y elasticidad: El corcho es el único cuerpo sólido que tiene la propiedad de ser comprimido sin dilatación lateral. Además, recupera hasta el 85% de su volumen inicial 24 horas después de haber sido sometido a una presión; esto hace que la resistencia al desgaste sea también más alta. Ambas propiedades varían en función de la hidratación del corcho y de su temperatura.
- Material con propiedades mecánicas resistentes: Fibra de vidrio. Se ha utilizado fibra de vidrio en tejido (roving). Estas mallas se tejen como las fibras textiles y son preparadas con un tratamiento antialcalino para hacerlas más resistentes. Se presentan en longitudes de 16 m y 1,25 m de ancho plegadas y envueltas en polietileno. Se emplea la fibra en tejido roving EWR 360.

La fibra de vidrio es un material con una gran resistencia a tracción, adecuada para absorber las sollicitaciones estructurales del refuerzo.

- Material ligante (fibra de vidrio – corcho): resina de poliéster. Las resinas son sustancias líquidas que pasan al estado sólido a partir de una reacción química inducida por un catalizador. En el caso de la resina de poliéster podemos hablar de dos tipos:
  - Resina de poliéster insaturada de tipo ortoftálica. Tiene un bajo contenido en estireno (ecológica), tixotrópica y se aplica mediante proyección simultánea. No obstante, por su reología también puede ser empleada por contacto a mano.
  - Resina de poliéster isoftálica: Tienen mejores propiedades que las ortoftálicas teniendo mejor resistencia al agua dado que su absorción es casi nula. No obstante, su precio es más elevado.

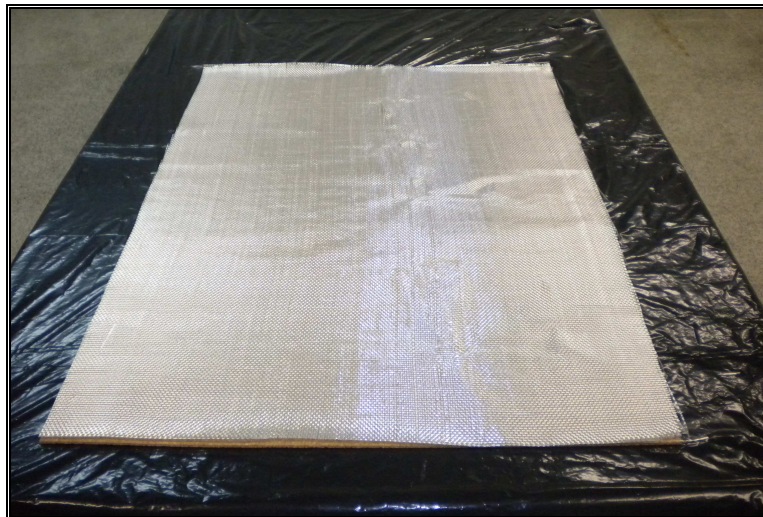
Para la fabricación del refuerzo se emplea la resina de tipo ortoftálica, preacelerada. Esta resina es de más bajo coste que la resina isoftálica. Como catalizador se emplea el peróxido de Mek con una proporción de 20 cc por cada kg de resina.

- Material ligante (refuerzo – madera): Resina epoxi. Las resinas epoxi son adhesivos de dos componentes con una polimerización rápida. Una vez endurecida no presenta problemas de retracción y aporta una gran resistencia a tracción y al impacto.

Para realizar la conexión entre los refuerzos y las vigas de madera hemos empleado una resina epoxi con una relación de la mezcla en peso 2:1 (100 g de resina por cada 50 g de endurecedor). Esta resina, de baja viscosidad e insoluble al agua, está compuesta a base de bisfenol-A-epiclorhidrina y oxirano, mono[(C12-14-alquilo)metil] y posee una densidad de 1,15 g/cc

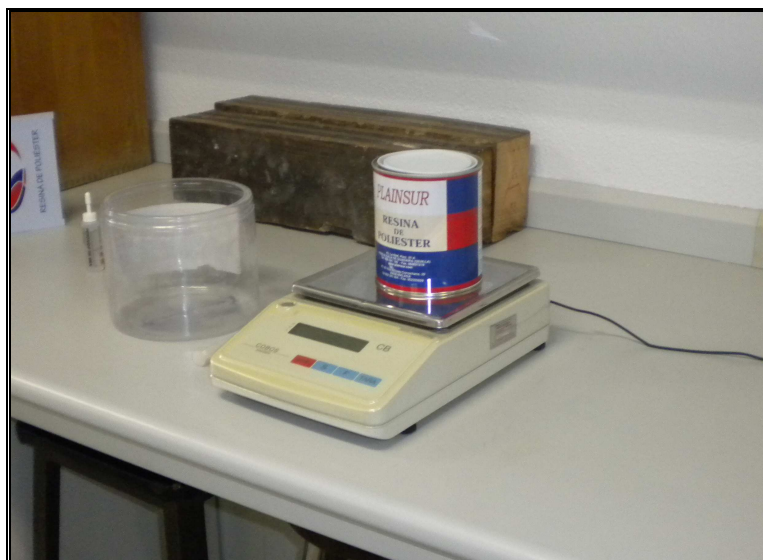
### V.5.2. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS REFUERZOS

Los refuerzos se preparan en planchas de 594 x 841 mm atendiendo a las dimensiones del formato del material soporte, el corcho. Siguiendo este patrón se corta la malla de fibra de vidrio (Figura V.53) y se coloca sobre el soporte.



**Figura V.53.** Preparación de la plancha de refuerzo: malla de fibra de vidrio colocada sobre el material soporte (dimensiones 594 x 841 mm).

Una vez preparados el corcho y la malla de fibra de vidrio se prepara la resina de poliéster, añadiendo el catalizador en la proporción indicada (Figura V.54). La dosificación del catalizador regula la velocidad de la reacción química de la resina, acelerando o retardando su proceso de solidificación. En este caso debemos verter 10 cc de catalizador por cada 500 g de resina de poliéster.



**Figura V.54.** Preparación de la resina de poliéster con el catalizador.

## PLAN EXPERIMENTAL

Preparada la resina procedemos a su aplicación. La aplicación de la resina se realiza con la ayuda de un rodillo (Figura V.55) cubriendo toda la superficie de la plancha (Figura v.56). Debe procurarse un reparto uniforme evitando la aparición de grumos y grandes concentraciones de resina.



**Figura V.55.** Aplicación de la resina de poliéster.



**Figura V.56.** Plancha de refuerzo tras aplicar la resina de poliéster.

Completada la imprimación dejamos secar la plancha hasta conseguir la solidificación de la resina de poliéster. De esta forma tenemos una plancha con una sola capa de fibra de vidrio. Si se necesita aumentar el número de capas de fibra se repite el proceso. En este caso, se han fabricado dos tipos de planchas: con una y dos capas de fibra.



Finalmente, la plancha se corta en pequeñas placas atendiendo a las dimensiones de los refuerzos necesarios (Figuras V.57 y V.58). Para cortar las planchas se emplea una sierra eléctrica.



**Figura V.57.** Corte de las planchas de refuerzo en placas (1).



**Figura V.58.** Corte de las planchas de refuerzo en placas (2).

### V.5.3. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO REFORZADAS

Una vez preparadas las placas de refuerzo, se han preparado varios lotes de probetas para su ensayo a cortante y flexión. Con ello se pretende ensayar la eficacia estructural del refuerzo en ambas situaciones. Estas probetas son de las especies *Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold y con las escuadrías empleadas en otros capítulos del presente trabajo.

Refuerzo de los apoyos:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Ensayo
<i>Pinus Sylvestris</i> L	18	50x50x725	Cortante
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	13	50x50x725	Cortante

Refuerzo de los centros de vano:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Ensayo
<i>Pinus Sylvestris</i> L	10	45x45x900	Flexión
<i>Pinus Sylvestris</i> L	5	50x50x1000	Flexión

En estas probetas se han ensayado refuerzos de distintas longitudes y 1 ó 2 capas de fibra de vidrio, respectivamente.

#### IV.5.3.1. Refuerzos a cortante. Refuerzos de los apoyos

Se han preparado varias vigas para reforzar sus apoyos a cortante. Para ello en cada viga se ha practicado una ranura de 6 mm de ancho y longitud variable en la que se ha introducido la placa de refuerzo. (Figuras V.59 y V.60). La longitud de estas placas se ha variado en función de la longitud de anclaje empleada. Asimismo, se ha variado el número de capas de fibra de vidrio (1 ó 2) que componen las placas de refuerzo. El objetivo es comprobar si se produce un aumento de la resistencia y/o del módulo de elasticidad para cada caso estudiado. De esta forma, tenemos:

- Refuerzos de una capa de fibra de vidrio:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	3	50x50x725	175 mm
<i>Pinus Sylvestris</i> L	3	50x50x725	215 mm
<i>Pinus Sylvestris</i> L	3	50x50x725	275 mm

- Refuerzos de dos capas de fibra de vidrio:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	3	50x50x725	175
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	3	50x50x725	215
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	3	50x50x725	275

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	4	50x50x725	275

Para medir la eficacia estructural de estos refuerzos se utilizan varias probetas testigos (probetas sanas sin reforzar). Asimismo, se mide la bajada de resistencia producida mediante el ranurado de las mismas.

- Probetas testigo (probetas sanas utilizadas como referencia para medir la eficacia estructural del refuerzo):

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm³)	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	3	50x50x725	--
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	3	50x50x725	--

- Probetas modificadas (probetas ranuradas y sin placa de refuerzo utilizadas para medir la bajada de resistencia producida por el ranurado):

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm³)	Longitud ranura (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	2	50x50x725	275
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	1	50x50x725	275

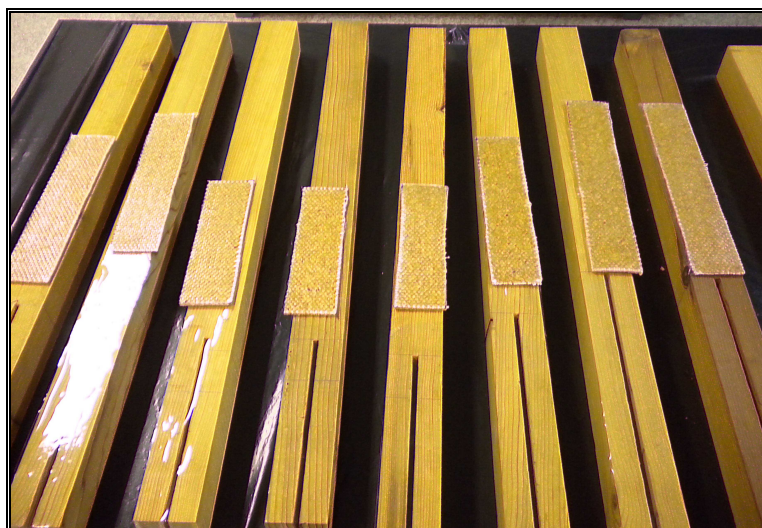


Figura V.59. Vigas y placas de refuerzo preparadas para aplicar la resina epoxi (1).



Figura V.60. Vigas y placas de refuerzo preparadas para aplicar la resina epoxi (2).

### Determinación de la longitud de la placa para los ensayos:

La longitud de anclaje se estima según el diagrama de cortantes originado por el ensayo (Capítulo V.5.4). No obstante, la bibliografía consultada<sup>5</sup> propone la siguiente expresión, basada en la experimentación:

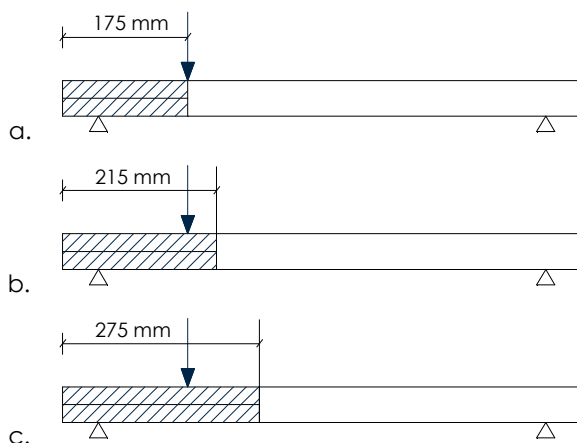
$$L_a = \frac{V_{p,d}}{2\mu} + \sqrt{\left(\frac{V_{p,d}}{2\mu}\right)^2 + \frac{M_{p,d}}{\mu}}$$

donde:

$L_a$	Longitud de anclaje desde la sección donde la placa deja de ser necesaria
$\mu = f_{vd} \cdot K_r \cdot d / 3$	
$f_{vd}$	Resistencia de cálculo a cortante paralelo a la fibra (deslizamiento de fibras)
$K_r$	Coeficiente que multiplicado por la resistencia a cortante paralelo a la fibra da la resistencia a cortante por rodadura. Su valor oscila entre 0,10 y 0,50 en función de la especie
$d$	Canto de la placa
$V_{p,d}$	Cortante de cálculo en la sección interrumpida (a una distancia igual a $L_0$ desde el apoyo).
$M_{p,d}$	Momento flector de cálculo existente en la sección intermedia en la longitud de anclaje (a una distancia igual a $L_0 + 0,5L_a$ ) dividido por el número de placas. La distancia $L_a$ no es conocida y debe predimensionarse.

Para esta ecuación, los valores de  $V_{p,d}$  y  $M_{p,d}$  son obtenidos de los diagramas de cortante y flector para el caso de una viga biapoyada con carga continua. Sin embargo, el procedimiento de ensayo a cortante practicado en este trabajo (Capítulo IV.5.4.) aplica una carga puntual a las vigas en una posición cercana al apoyo. Esto origina que la aplicación de esta ecuación a los resultados de este ensayo dé lugar a unas longitudes de anclaje excesivas no extrapolables para esta situación.

No obstante, se recomienda que como valor mínimo se emplee  $L_a = 2,5 \cdot d$ , siendo  $d$  el canto de la pieza. También se recomienda que la longitud obtenida por cálculo se mayor con un coeficiente de seguridad que varía entre 1,0 y 1,6, en función de las condiciones de ejecución. Para el caso que nos ocupa debemos usar un valor mínimo de  $L_a = 2,5 \cdot 5$  (canto de la pieza) = 12,5 cm = 125 mm con lo que origina una longitud de placa mínima de 175 mm. Partiendo de esa longitud hemos empleado unas longitudes de 175, 215 y 275 mm. (Figura V.61).



**Figura V.61.** Longitudes de los refuerzos en función del ensayo realizado (a. Longitud de placa coincidente con el punto de aplicación de la carga. b. Longitud de placa 40 mm superior sobre el punto de aplicación de la carga. c. Longitud de placa 100 mm superior sobre el punto de aplicación de la carga).

<sup>5</sup> Arriaga, F., Peraza, F., Esteban M., Bobadilla, I., García, F. "Intervención en estructuras de madera". AITIM (2002). 464 págs. ISBN: 84-873-8124-3.



**V.5.3.2. Refuerzos a flexión. Refuerzos de los centros de vano**

Para ensayar la eficacia de los refuerzos a flexión se preparan varias vigas a las que se le incorpora la placa de refuerzo. Para ello, en los centros de vano se practica una ranura de 6 mm de ancho y longitud variable en la que se introduce el refuerzo (Figura V.62). La longitud de los refuerzos varía en función de la longitud de anclaje empleada. En todos los casos se emplean refuerzos con dos capas de fibra de vidrio. El objetivo es comprobar si se produce un aumento de la resistencia y/o del módulo de elasticidad para cada caso. De esta forma tenemos:

- Refuerzos de dos capas:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	2	45x45x900 <sup>6</sup>	470
<i>Pinus Sylvestris</i> L	2	45x45x900	570
<i>Pinus Sylvestris</i> L	2	45x45x900	670

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus sylvestris</i> L	4	50x50x1000	900

- Probetas testigo (utilizadas como referencia para medir la eficacia del refuerzo):

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud refuerzo (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	1	45x45x900	--

- Probetas modificadas (utilizadas para medir la bajada de resistencia producida por el ranurado):

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud ranura (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	1	45x45x900	470
<i>Pinus Sylvestris</i> L	1	45x45x900	570
<i>Pinus Sylvestris</i> L	1	45x45x900	670

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Longitud ranura (mm)
<i>Pinus Sylvestris</i> L	1	50x50x1000	900 mm



**Figura V.62.** Vigas ranuradas y reforzadas para el ensayo de flexión.

<sup>6</sup> Las escuadrías de estas probetas difieren de las empleadas comúnmente (50x50 mm<sup>2</sup>) por un fallo de carpintería. No obstante, los resultados son comparables con el resto aplicando el factor de corrección por canto,  $K_h$ .  $K_h = (150/h)^{0.2}$  donde h es el canto.

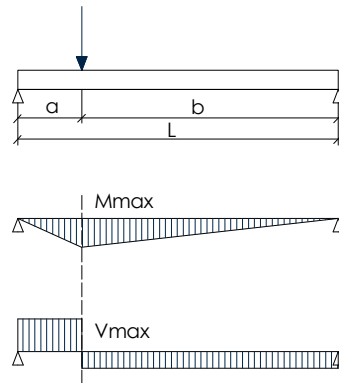
### V.5.4. ENSAYOS REALIZADOS

Preparado todo el material se realizan los ensayos a cortante y a flexión.

#### V.5.4.1. Ensayos de cortante

Actualmente no existe ningún ensayo que permita estimar, para la madera, la resistencia a cortante perpendicular a las fibras. Por esta razón, en este caso se ha empleado una metodología aplicada al ensayo de placas alveolares y viguetas de hormigón. Con este ensayo se pretende conocer la resistencia a cortante de las vigas de madera reforzadas según el método "a" descrito en el anexo J de la norma UNE EN 1168:2005.

Según este método para estimar la resistencia a cortante debe aplicarse una carga puntual vertical y hacia abajo en la viga a ensayar a una distancia  $2,5 h$  del apoyo. Para el ensayo se emplea la prensa del Laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. Se trata de una prensa electromecánica multiensayo servocontrolada, modelo MEM-101/M4 de la marca Suzpecar. Esta dotada de una célula de carga de 20 T y posibilidad de control de funcionamiento mediante un sistema electrónico de regulación por recorrido o por carga. Para este ensayo se emplea el control por recorrido aplicando una velocidad de carga de 9 mm/min.



**Figura V.63.** Metodología de ensayo a cortante según UNE EN 1168:2005.

Para el ensayo definido, el cortante máximo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{\max} = \frac{P \cdot b}{L} = \frac{P \cdot (L - a)}{L}$$

siendo;

- P Carga total aplicada en kilonewtons, KN.
- L Longitud entre apoyos de la viga en metros, m.
- a Distancia entre el punto de aplicación de la carga y el apoyo más cercano en metros ( $a = 2,5 h$ ), m.
- h Canto de la viga en metros, m.

Análisis comparativo de la situación de cargas ensayada y la situación real de un forjado:

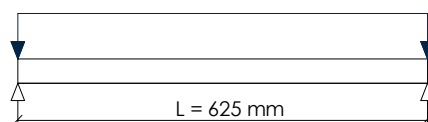
En un ensayo con las probetas empleadas en el presente trabajo de investigación en el que se simulan las condiciones reales de las viguetas de un forjado aparecen las siguientes condiciones:

Luz libre: 625 mm.

Escuadría de las piezas: 50x50 mm.

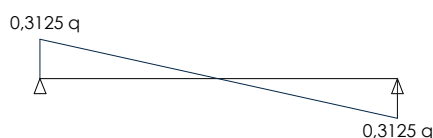
Cargas: carga continua,  $q$ .

Estas condiciones quedan representadas en el siguiente esquema (Figura V.64):



**Figura V.64.** Estado real de cargas de una viga en un forjado. Carga continua

Con estas condiciones el diagrama de esfuerzo cortante es el siguiente (Figura V.65):



**Figura V.65.** Diagrama de cortantes en una viga derivado de una carga continua.

En este diagrama se observa que el **cortante máximo** aparece en el extremo con un valor de **0,3125 q**.

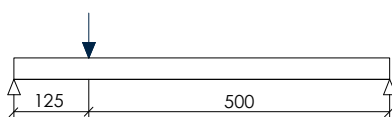
Extrapolando esta situación de cargas a una carga puntual tenemos que:

Luz libre: 625 mm.

Escuadría de las piezas: 50x50 mm.

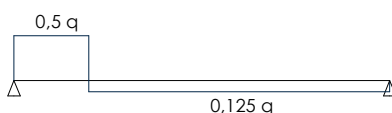
Cargas: carga puntual de 0,625 q.

Estas condiciones se recogen en la siguiente figura (Figura V.66):



**Figura V.66** Estado de cargas de una viga durante el ensayo.

Con estas condiciones el diagrama de esfuerzo cortante es el siguiente (Figura V.67):



**Figura V.67** Diagrama de cortantes en una viga derivado de una carga puntual.

En este diagrama se observa que el **cortante máximo** aparece en el tramo comprendido entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga con un valor de **0,5 q**.

Con todo ello, para justificar que estamos utilizando cargas de ensayo que corresponden a valores similares o superiores a los valores de carga a los que se ve sometido un forjado hemos ensayado a cortante, según el procedimiento descrito en el Capítulo V.5.4.1, 6 probetas testigo. Los valores obtenidos correspondientes a las cargas puntuales aplicadas en el ensayo (P) se han extrapolado a cargas continuas ( $q_{\text{continua}}$ ).

**Tabla V.7.** Valores de las cargas puntuales obtenidos en el ensayo de cortante sobre las probetas testigo (P) y su extrapolación a cargas continuas.

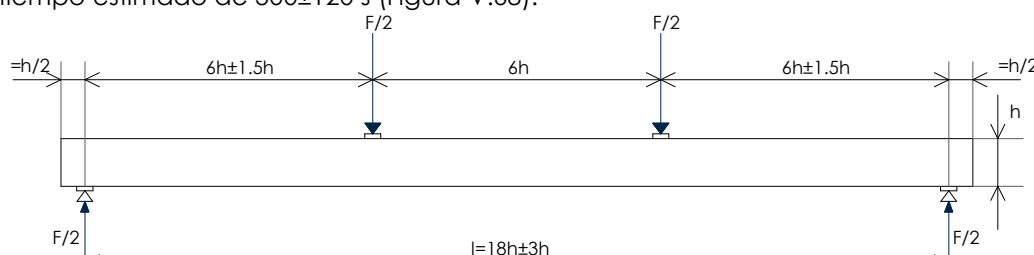
PROBETA TESTIGO Nº	SITUACIÓN ENSAYO			SITUACIÓN REAL FORJADO
	P (KN)	$V_{\text{max}}$ (KN) ( $V_{\text{max}} = 0,5 q$ )	$q_{\text{continua ensayo}}$ (KN/m) ( $q = V_{\text{max}}/0,5$ )	$q_{\text{continua real}}$ (KN/m) ( $q_{\text{continua real}} = q_{\text{continua ensayo}}/2,30$ )
1	11,75	9,40	18,80	8,17
2	12,41	9,92	19,84	8,62
3	13,66	10,92	21,84	9,49
4	12,57	10,05	20,10	8,73
5	11,45	9,16	18,32	7,96
6	13,39	10,71	21,42	9,31

Para extrapolar el valor de las cargas continuas obtenidas en el ensayo (transformando la carga puntual a una carga continua) a las cargas reales de un forjado se aplica un factor de corrección en el que se engloba el efecto de la duración de las cargas (pasan de ser instantáneas en el ensayo a permanentes en un forjado real) y el efecto de tamaño de las probetas. Este coeficiente toma un valor de 2,30<sup>7</sup>.

Los resultados de la Tabla V.7 demuestran que estamos por encima del rango de cargas reales a las que está sometido un forjado. Asimismo, el procedimiento de ensayo aplicado mediante carga puntual conlleva que las secciones ensayadas (donde se localiza los refuerzos) estén por encima de las sollicitaciones que se generan en un forjado biapoyado.

### V.5.4.2. Ensayos de flexión

Se realizan los ensayos de flexión según el procedimiento de la norma UNE EN 408:2011. Se aplica una carga sobre dos puntos simétricos de la probeta, situada simplemente apoyada, a una velocidad constante de 0,15 mm/s hasta alcanzar la rotura de la pieza en un tiempo estimado de  $300 \pm 120$  s (Figura V.68).



**Figura V.68.** Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de las probetas reforzadas.

La resistencia a flexión  $f_m$ , se calcula mediante la ecuación:

$$f_m = \frac{\alpha F_{\text{max}}}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- $\alpha$  Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en milímetros, mm.
- $W$  Módulo resistente en milímetros elevados a la tercera potencia,  $\text{mm}^3$ .

<sup>7</sup> Este coeficiente incluye el factor de duración de las cargas  $k_{\text{mod}}$  (Tabla 2.4 CTE SE-M) para el paso de carga instantánea a permanente y el factor de tamaño de las probetas  $k_h$ . Su valor se obtiene:  $2,30 = 1,245 / (0,9 \cdot 0,6)$

## CAPÍTULO VI.

# RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

**VI.1.** RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

**VI.2.** RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL

**VI.3.** RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA

**VI.4.** RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS

**VI.5.** RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGA



## **VI.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS**

---

**VI.1.1. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN SU TEMPERATURA SUPERFICIAL**

**VI.1.2. DETECCIÓN DE DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD EN LA MADERA**

**VI.1.3. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU PROFUNDIDAD**

**VI.1.4. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU TAMAÑO**

**VI.1.5. DETECCIÓN DE GALERÍAS INTERNAS EN LA MADERA**

## RESUMEN

Los resultados de los ensayos de termografía de infrarrojos se exponen en función de los objetivos perseguidos en cada caso. De esta forma, la exposición de resultados se plantea como sigue:

- Resultados sobre el estudio de la influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial.
- Resultados sobre la detección de diferentes contenidos de humedad en la madera.
- Resultados sobre la detección de defectos internos en función de su profundidad.
- Resultados sobre la detección de defectos internos en función de su tamaño.
- Resultados sobre la detección de galerías internas en la madera.



### VI.1.1. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN SU TEMPERATURA SUPERFICIAL

Para estudiar el efecto que produce la densidad de la madera sobre su temperatura superficial, mostrada en una imagen termográfica, se han utilizado 15 probetas de 5 especies botánicas (eucalipto, álamo, roble, pino y cedro) distintas cuyas densidades medias se especifican a continuación (Tabla VI.1.).

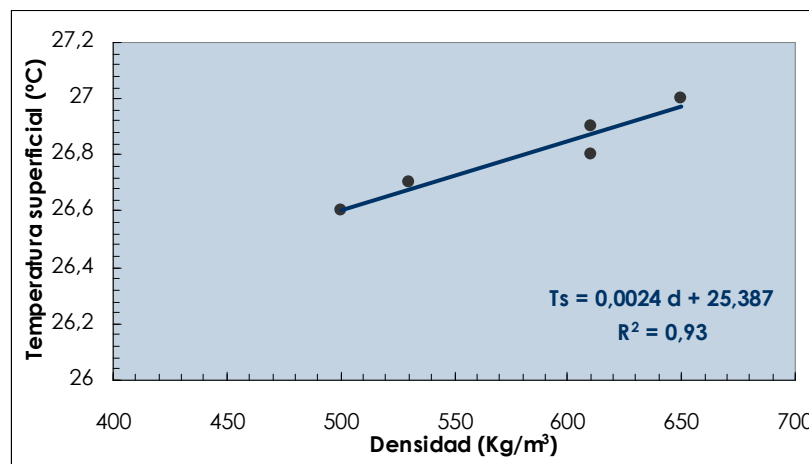
**Tabla VI.1:** Densidades medias de las distintas especies de ensayo.

ESPECIE	DENSIDAD MEDIA PROJETAS (Kg/m <sup>3</sup> )
Eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> )	650
Álamo ( <i>Populus Alba</i> )	610
Roble ( <i>Quercus robur</i> )	610
Pino ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	530
Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> )	500

*Procedimiento operatorio:*

El desarrollo del procedimiento operatorio, llevado a cabo en dos fases, arroja los siguientes resultados:

- En la primera fase, termografía pasiva, se han tomado varias imágenes termográficas del conjunto. En estos termogramas se observa como la temperatura superficial de las probetas varía ligeramente de unas a otras extrayéndose la siguiente relación (Figura VI.1):



**Figura VI.1.** Relación entre la densidad media de la madera y su temperatura superficial.

El resumen de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº de probetas	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
5	$T_s = 0,0024 d + 25,387$	0,93

siendo;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en grados centígrados, °C.  
 $D$  Densidad de las probetas de ensayo en Kg/m<sup>3</sup>.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

• En la segunda fase, termografía activa, tras estimular térmicamente las probetas en la estufa a 80 °C durante 30 minutos, se ha realizado un seguimiento del proceso de enfriamiento tomando imágenes termográficas cada 30 segundos durante 40 minutos. En la Figura VI.2 se muestran los resultados que se han obtenido en diferentes instantes del proceso de enfriamiento.

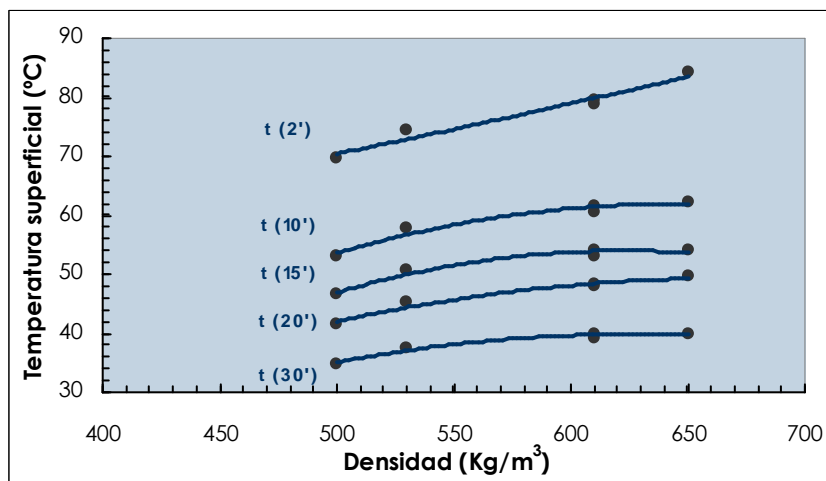


Figura VI.2. Temperatura superficial de la madera en diferentes instantes del proceso de enfriamiento.

Estas relaciones quedan recogidas en las siguientes expresiones matemáticas:

Tiempo enfriamiento	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R²)
2'	$T_s = 0,0872 d + 26,72$	0,96
10'	$T_s = -4 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,52 d - 105,43$	0,96
15'	$T_s = -5 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,5898 d - 129,6$	0,97
20'	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,3412 d - 64,97$	0,97
30'	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,369 d - 75,825$	0,97

siendo en cada caso;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en grados centígrados, °C

$D$  Densidad de las probetas de ensayo en Kg/m³

Estos resultados (fases de termografía pasiva y activa) han sido obtenidos bajo las condiciones ambientales específicas del día de ensayo:

- Temperatura ambiente: 26,6 °C.

- Humedad relativa: 53 %.

Estos parámetros, así como la emisividad de la madera y la temperatura ambiente reflejada, han sido configurados previamente en la cámara termográfica.

**Discusión de resultados y conclusiones:**

1. Es posible distinguir, a través de la termografía, diferentes tipos de madera como resultado de una diferencia de densidad entre ellas.

En *termografía pasiva*, tras un leve enfriamiento del aire, con unas condiciones ambientales de aproximadamente 26,6°C y 53% de humedad relativa se obtiene, para las probetas ensayadas, una relación entre la temperatura superficial de las piezas ( $T_s$ ) y su densidad ( $d$ ) dada por la siguiente expresión:

$$T_s = 0,0024 d + 25,387$$

$$R^2=0,93$$

En *termografía activa*, durante la fase de enfriamiento de las piezas tras haberlas estimulado térmicamente en estufa, se obtiene, para unas condiciones ambientales de 26,6°C y 53% y las probetas ensayadas, que las diferencias térmicas entre piezas se acentúan y quedan reflejadas en diferentes instantes del proceso mediante las expresiones y coeficientes de correlación siguientes:

- A los 2 minutos:	$T_s = 0,0872 d + 26,72$	$R^2=0,96$
- A los 10 minutos:	$T_s = -4 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,52 d - 105,43$	$R^2=0,96$
- A los 15 minutos:	$T_s = -5 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,5898 d - 129,6$	$R^2=0,97$
- A los 20 minutos:	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,3412 d - 64,97$	$R^2=0,97$
- A los 30 minutos:	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,369 d - 75,825$	$R^2=0,97$

Siendo en todos los casos,

$T_s$	Temperatura superficial de las muestras en grados centígrados, °C.
$d$	Densidad de la muestra en Kg/m <sup>3</sup> .

En el análisis de estas expresiones, tanto en termografía pasiva como activa, se observa que al aumentar la densidad de una pieza aumenta su temperatura superficial. No obstante, esta casuística no debe tomarse como criterio general. Al analizar el fenómeno inverso de la termografía activa, es decir, la fase de calentamiento, reflejada en el caso de San Felipe Neri, Cádiz (Anejo A) donde los termogramas se tomaron a las 12 de la mañana coincidiendo con el calentamiento de la cubierta, puede observarse como las zonas de nudos (zonas de mayor densidad) presentan una temperatura superficial inferior al resto de la pieza. En ambos casos, los resultados se explican por el efecto que produce la densidad de la madera sobre las propiedades térmicas del material.

La influencia de la densidad de la madera sobre su temperatura superficial tiene su origen en el efecto que produce esta propiedad sobre las propiedades térmicas del material, quedando ratificado en estos ensayos en los que coincidimos con otros investigadores, tales como Tanaka, que obtuvieron resultados similares. La densidad interviene directamente sobre la conductividad térmica y difusividad de la madera, propiedad ésta última que representa cuán rápido se difunde el calor por un material. Como resultado da lugar a que, durante el proceso de calentamiento de la madera, las zonas con una mayor densidad, que tienen una menor difusividad, se calienten más lentamente mostrando una temperatura inferior y durante el proceso inverso, enfriamiento, estas zonas conserven mejor el calor y por tanto, se enfríen más lentamente, reflejando una temperatura superior, permitiendo así localizar zonas de nudos en la madera.

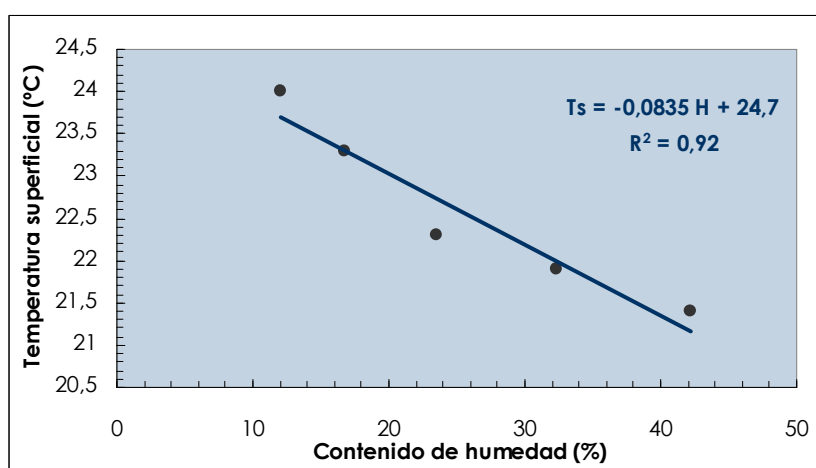
### VI.1.2. DETECCIÓN DE DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD EN LA MADERA

Para estudiar el efecto de la humedad sobre una imagen termográfica se han preparado varias piezas con contenidos de humedad diferentes (Tabla VI.2):

**Tabla VI.2.** Contenido de humedad alcanzado por las probetas el día de ensayo.

PROBETA N°	PESO SECO (g)	PESO DÍA DE ENSAYO (g)	HUMEDAD (%)
1	1174,37	1670,83	42,27
2	1214,25	1499,16	23,46
3	759,31	1005,23	32,38
4	1133,12	1323,65	16,80
5	827,07	926,32	12,00

El procedimiento experimental se ha realizado en una única fase, *termografía pasiva* según lo descrito en el Capítulo V.1.3.2. Se han tomado varias imágenes termográficas del conjunto en las que se observa como la temperatura superficial de las probetas varía dependiendo de su contenido de humedad extrayéndose la siguiente relación (Figura VI.3):



**Figura VI.3.** Temperatura superficial (°C) de la madera en función de su contenido de humedad (%).

El resumen de la correlación obtenida es el siguiente:

N° de probetas	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R²)
5	$T_s = -0,0835 H + 24,7$	0,92

siendo;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en grados centígrados, °C.  
 $H$  Contenido de humedad de la pieza en porcentaje, %.

Estos resultados han sido obtenidos bajo las condiciones ambientales del día de ensayo, 22°C de temperatura ambiente y 70,5% de humedad relativa.

Estos parámetros así como la emisividad de la madera y la temperatura ambiente reflejada han sido configurados previamente en la cámara termográfica.

**Discusión de resultados y conclusiones:**

1. Es posible detectar focos de humedad mediante termografía infrarroja y distinguir diferentes grados de contenido de humedad como resultado de una alteración de las propiedades térmicas de la madera. De esta forma la relación obtenida entre el contenido de humedad de una madera en porcentaje (H) y su temperatura superficial ( $T_s$ ) queda expresada mediante la ecuación:

$$T_s = -0,0835 H + 24,7$$

$$R^2 = 0,92$$

El análisis de esta expresión obtenida en un ensayo sin estimulación térmica adicional, *termografía pasiva*, revela que conforme se aumenta el contenido de humedad de una madera, H, disminuye su temperatura superficial,  $T_s$ . Este fenómeno se explica por el efecto que causa el agua sobre las propiedades térmicas de la madera.

El agua produce una alteración de las propiedades térmicas de la madera, conductividad, calor específico y difusividad. El calor específico, que corresponde a la cantidad de calor necesario para incrementar un grado de temperatura un material por unidad de masa ( $J/Kg^{\circ}C$ ), varía significativamente entre la madera y el agua como materiales. De esta forma, para una cantidad de calor, Q, constante, el agua, cuyo calor específico ( $4186 J/(Kg/K^{\circ})$ ) es mayor que el de la madera ( $1760 J/Kg/K^{\circ}$ ), conlleva a que las zonas con un mayor contenido de humedad presenten valores de temperatura inferiores ya que necesitan un mayor aporte de calor para incrementar su temperatura. De esta forma coincidimos con autores como Abedi y S. Banerjee que presentaron un estudio en el que obtuvieron una relación lineal entre la humedad de la madera y su temperatura superficial de forma que al aumentar el contenido de humedad disminuía su temperatura.

Teniendo en cuenta estos resultados, en el supuesto de evaluar un proceso inverso de transmisión de calor, es decir, una fase de enfriamiento (caso de las cubiertas de los edificios al atardecer), las zonas humedecidas deberán registrar valores de temperatura superiores con respecto a las zonas donde se localice la madera seca. Análogamente, este fenómeno se explica por un incremento de la capacidad de la madera humedecida para retener el calor como resultado del aumento de su calor específico producido por el agua.

### VI.1.3. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU PROFUNDIDAD

Para estudiar las posibilidades de la termografía de infrarrojos en la detección de defectos internos en función de su profundidad se ha preparado una serie de 3 probetas en las que se ha tallado un defecto, en cada caso, a las profundidades de 5, 10 y 15 mm. En todos los casos el tamaño del defecto es idéntico, 40 x 40 mm.

El estudio se ha realizado en dos supuestos distintos:

- 1) Defectos secos: Tanto el defecto como el resto de la probeta tienen el mismo contenido de humedad. Este supuesto aparece cuando el proceso de deterioro se ha producido con anterioridad (antiguas filtraciones,...)
- 2) Defectos húmedos: El contenido de humedad del defecto es superior al resto de la madera de la probeta. En este caso el proceso de deterioro está activo.

#### VI.1.3.1. Defectos secos:

El análisis para la detección de defectos secos se ha realizado en dos fases, termografía pasiva y termografía activa. Los resultados de ambos procesos se muestran a continuación.

- Termografía pasiva.

Los resultados de esta fase se muestran en la Figura VI.4.

- Termografía activa.

Los resultados obtenidos en esta fase se muestran en las Figuras VI.5, VI.6 y VI.7, para cada caso (defectos situados a 5, 10 y 15 mm de la superficie). Todos los termogramas del ensayo se recogen en el Anejo 01.

Estos resultados han sido obtenidos después de la estimulación térmica de las probetas en una estufa durante 45 minutos a 80 °C y tras realizar un seguimiento de su proceso de enfriamiento situando la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m de las mismas.

Las condiciones ambientales del día del ensayo han sido:

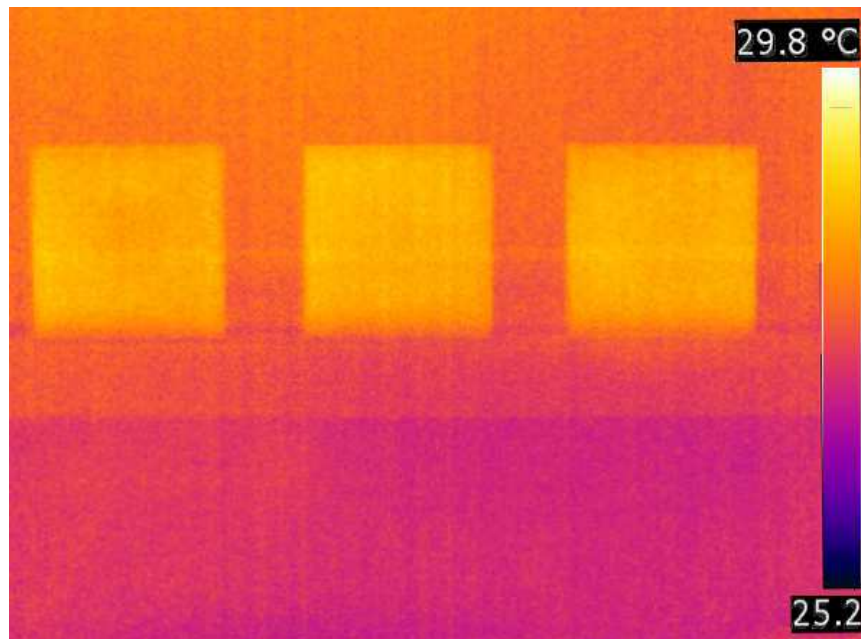
- Temperatura ambiente: 26 °C.
- Humedad relativa: 51%.

Asimismo, los resultados obtenidos en fase de termografía activa mediante estimulación térmica con foco portátil se muestran en las Figuras VI.8 y VI.9. Ambas figuras ilustran los resultados obtenidos para las probetas con defectos de 40x40 mm.

Estos resultados han sido obtenidos situando las probetas enfrentadas a la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m y a una distancia del foco portátil de 0,70 y 0,35 m, respectivamente. En estos ensayos se han tomado imágenes termográficas durante dos fases: en la fase de calentamiento con el foco encendido, durante 582'' y 384'', respectivamente, y en la fase de enfriamiento tras apagar el foco, durante 1405'' y 1018'', respectivamente. Los termogramas de ambos ensayos se recogen en los Anejos 02 y 03.

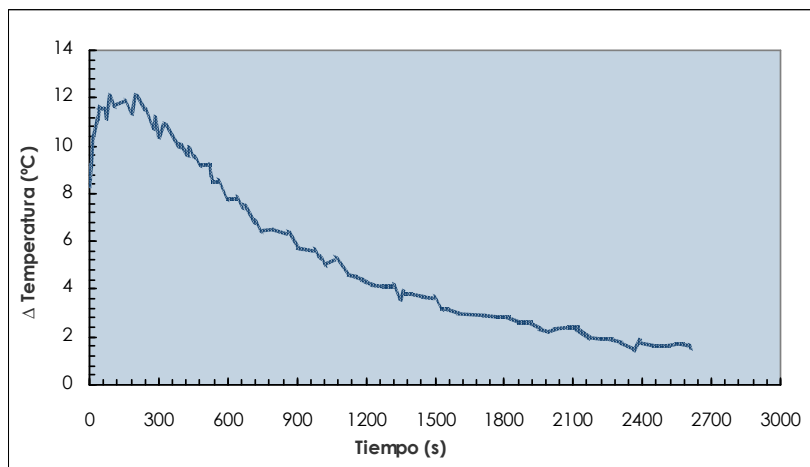
La temperatura ambiental del día del ensayo ha sido de 22 °C.

*Termografía pasiva:*

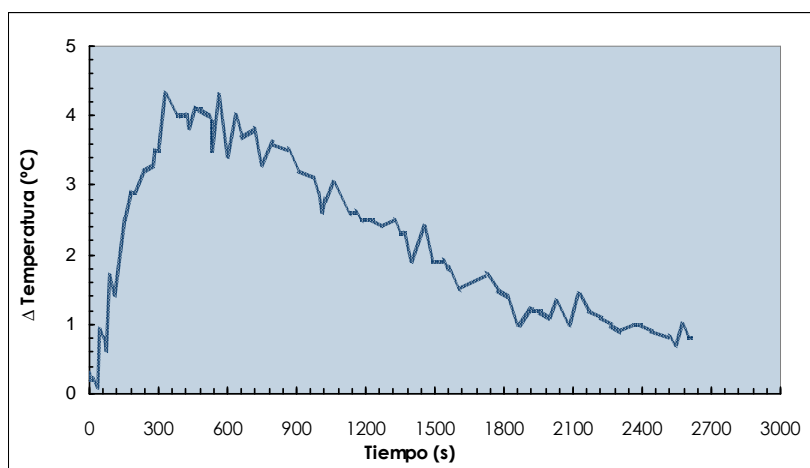


**Figura VI.4.** Termograma obtenido para la serie 1 en la fase de termografía pasiva. No es posible diferenciar ningún defecto alguno en las probetas independientemente de la profundidad de éstos.

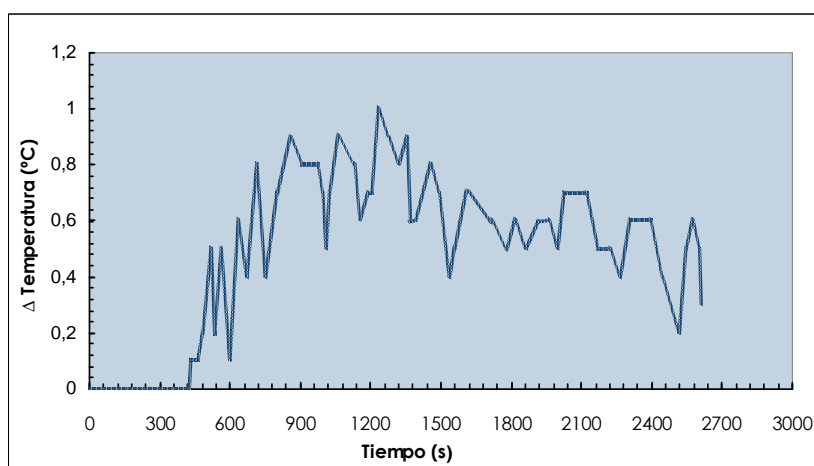
Termografía activa (estimulación térmica en estufa):



**Figura VI.5.** Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.6.** Defecto situado a 10 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.7.** Defecto situado a 15 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa.



Matemáticamente las Figuras VI.5, VI.6 y VI.7 quedan recogidas en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	0,82
	t [200 - 2700 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	0,99
Defecto a 10 mm	t (0 - 400 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0189t - 0,1121$	0,96
	t [400 - 2700 s)	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0029t + 5,3487$	0,97
Defecto a 15 mm	t (0 - 400 s)	$\Delta T = 0$	-
	t (400 - 1200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0041t - 1,3239$	0,75
	t (1200 - 2700 s)	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0018t + 2,3258$	0,40

siendo en cada caso;

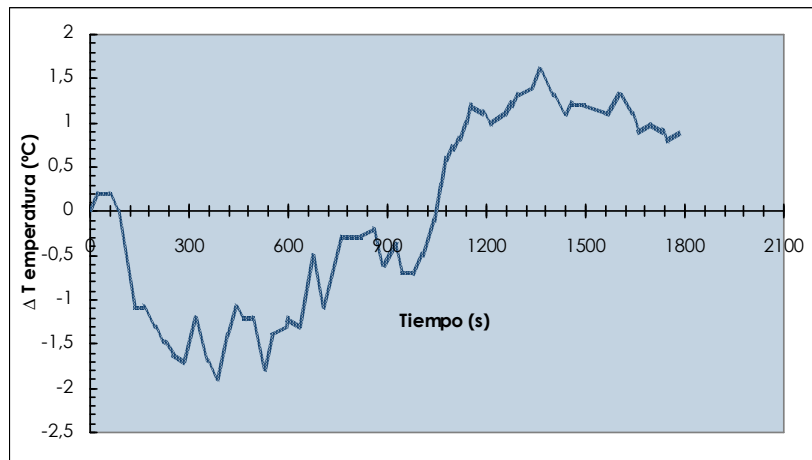
t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.

$\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^\circ$  área sana de la probeta –  $T^\circ$  defecto) en grados centígrados, °C

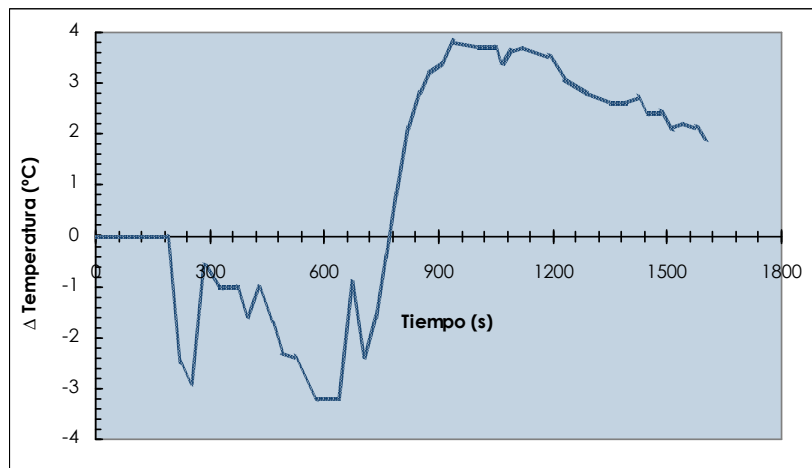
Analizando las Figuras VI.5, VI.6 y VI.7 y dando valores de tiempo, t, a las expresiones matemáticas aportadas, se obtiene que las variaciones térmicas máximas en cada caso son:

- Defectos situados a 5 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ . t = 150 s.
- Defectos situados a 10 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ . t = 400 s.
- Defectos situados a 15 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . t = 1000 s.

Termografía activa (estimulación térmica con foco portátil):



**Figura VI.8.** Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco 0,70 m.



**Figura VI.9.** Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco 0,35 m.

Matemáticamente la Figura VI.8 queda recogida en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 1000 s)	CALENT.	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-8}t^3 + 2 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0127t + 0,4918$	0,83
	t [1000 - 1800 s)	ENFR.	$\Delta T = -5 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0149t - 9,3563$	0,72
Defecto a 10 mm	Sin resultados perceptibles			
Defecto a 15 mm	Sin resultados perceptibles			

siendo en cada caso;

- t      Tiempo durante la fase de calentamiento o enfriamiento en cada caso en segundos, s.
- $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^a$  área sana de la probeta –  $T^a$  defecto) en grados centígrados, °C.

Analizando la Figura VI.8, y dando valores de tiempo, t, a las expresiones matemáticas aportadas, se obtiene que las variaciones térmicas máximas en cada caso son:

Fase de calentamiento:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 2$  °C. t = 500 s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.

Fase de enfriamiento:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 1,7$  °C. t = 1400 s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.

Matemáticamente la Figura VI.9 queda recogida en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	CALENT.	$\Delta T = 0$	-
	t [200 - 800 s)	CALENT.	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0296t + 3,9796$	0,88
	t [800 - 1600 s)	ENFR.	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0250t - 11,50$	0,76
Defecto a 10 mm	Sin resultados perceptibles			
Defecto a 15 mm	Sin resultados perceptibles			

siendo en cada caso;

- t Tiempo durante la fase de calentamiento o enfriamiento en cada caso en segundos, s.
- $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^a$  área sana de la probeta –  $T^a$  defecto) en grados centígrados, °C.

Analizando la Figura VI.9, y dando valores de tiempo, t, a las expresiones matemáticas aportadas, se obtiene que las variaciones térmicas máximas en cada caso son:

Fase de calentamiento:

- Defectos situados a 5 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 3,30$  °C. t = 500 s.
- Defectos situados a 10 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.
- Defectos situados a 15 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.

Fase de enfriamiento:

- Defectos situados a 5 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 4$  °C. t = 1150 s.
- Defectos situados a 10 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.
- Defectos situados a 15 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max}$  = sin variación térmica perceptible.

**VI.1.3.2. Defectos húmedos:**

Esta segunda fase del ensayo se ha realizado en termografía activa con el objetivo de cuantificar el incremento térmico producido por la humedad de los defectos.

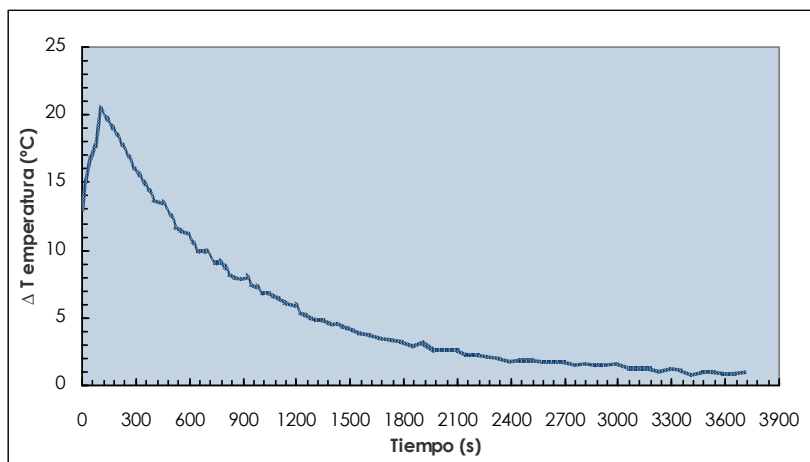
Los resultados obtenidos en esta fase se muestran en las Figuras VI.10, VI.11 y VI.12, para cada caso (defectos situados a 5, 10 y 15 mm de la superficie). Asimismo, todos los termogramas tomados durante el ensayo se recogen en el Anejo 04.

Nuevamente estos resultados han sido obtenidos después de la estimulación térmica de las probetas en una estufa durante 45 minutos a 80 °C y tras realizar un seguimiento de su proceso de enfriamiento situando la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m de las mismas.

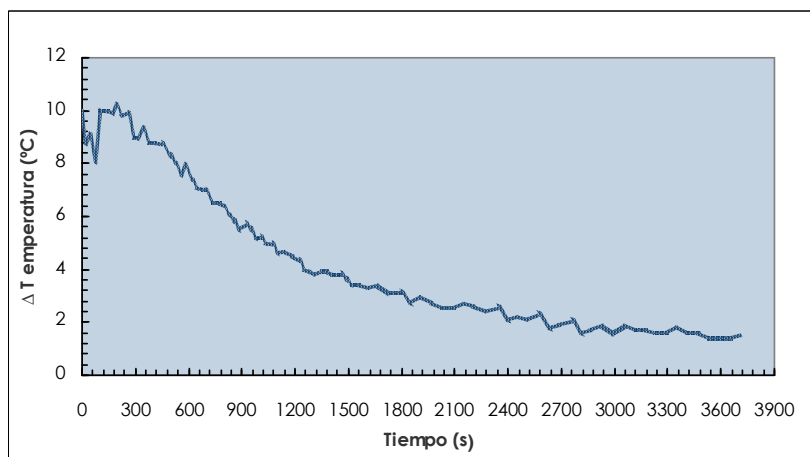
Las condiciones ambientales del día del ensayo han sido:

- Temperatura ambiente: 24 °C
- Humedad relativa: 50%

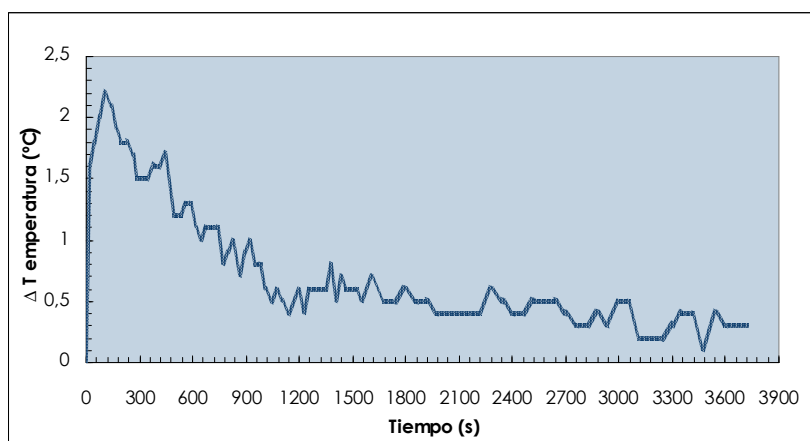
Termografía activa (estimulación térmica en estufa):



**Figura VI.10.** Defecto situado a 5 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.11.** Defecto situado a 10 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.12.** Defecto situado a 15 mm de profundidad. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.

Matemáticamente las Figuras VI.10, VI.11 y VI.12 quedan recogidas en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92$	0,96
	t (200 - 3000 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096$	0,97
Defecto a 10 mm	t (0 - 700 s)	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0049t + 8,977$	0,82
	t (700 - 3000 s)	$\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0049t + 9,3411$	0,98
Defecto a 15 mm	t (0 - 1000 s)	$\Delta T = 1 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,0011t + 1,7994$	0,81
	t (1000 - 3000 s)	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 + 0,0003t + 0,9409$	0,54

Siendo en cada caso;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.

$\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^a$  área sana de la probeta –  $T^a$  defecto) en grados centígrados, °C.

Analizando las Figuras VI.10, VI.11 y VI.12 y dando valores de tiempo, t, a las expresiones matemáticas, se obtiene que las variaciones térmicas máximas en cada caso son:

- Defectos situados a 5 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 20$  °C. t = 120 s.
- Defectos situados a 10 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 10$  °C. t = 250 s.
- Defectos situados a 15 mm de la superficie:  $\Delta T_{\max} = 2$  °C. t = 500 s.

### VI.1.4. DETECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN FUNCIÓN DE SU TAMAÑO

En el análisis de las posibilidades de la termografía de infrarrojos en la detección de defectos internos en función de su tamaño se ha preparado una serie de 3 probetas en las que se ha tallado un defecto con un tamaño diferente en cada caso, 10x10, 20x20 y 40x40 mm. En todos los casos la profundidad a la que se ubica el defecto es análoga, 5 mm.

Como en el Capítulo VI.1.3., el estudio se ha realizado en dos supuestos:

- 1) Defectos secos: Tanto el defecto como el resto de la probeta tienen el mismo contenido de humedad. Este supuesto aparece cuando el proceso de deterioro se ha producido con anterioridad (antiguas filtraciones,...).
- 2) Defectos húmedos: El contenido de humedad del defecto es superior al resto de la madera de la probeta. En este caso el proceso de deterioro está activo.

#### VI.1.4.1. Defectos secos:

El análisis para la detección de defectos secos se ha realizado en dos fases, termografía pasiva y termografía activa. Los resultados de ambos procesos se muestran a continuación.

- Termografía pasiva.

Los resultados de esta fase se muestran en la Figura VI.4. Aunque en este termograma está reflejado el conjunto de probetas de la serie 1, el termograma obtenido para la serie 2 es idéntico con lo que puede emplearse la misma figura para ilustrar el resultado.

- Termografía activa.

Los resultados obtenidos en fase de termografía activa mediante estimulación térmica en estufa se muestran en las Figuras VI.13 y VI.14 (defectos de 40x40 y 20x20 mm). Asimismo, todos los termogramas recogidos durante el proceso se muestran en el Anejo 05.

Estos resultados han sido obtenidos después de la estimulación térmica de las probetas en una estufa durante 45 minutos a 80 °C y tras realizar un seguimiento de su proceso de enfriamiento situando la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m de las mismas.

Las condiciones ambientales del día del ensayo han sido:

- Temperatura ambiente: 26°C
- Humedad relativa: 51 %

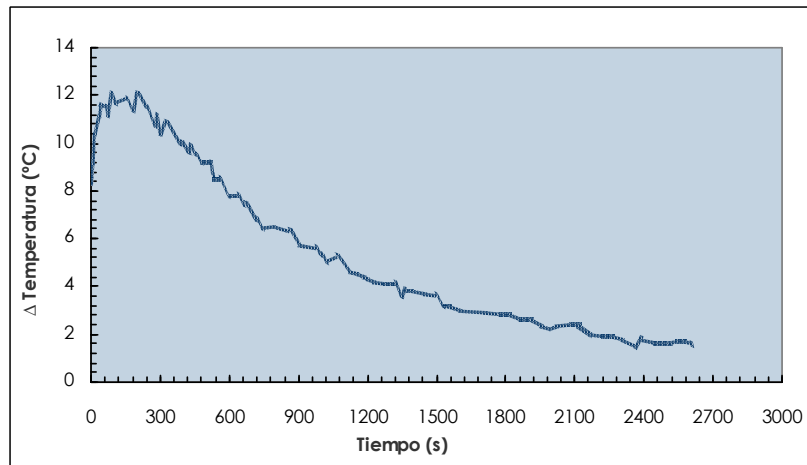
Asimismo, los resultados obtenidos en fase de termografía activa mediante estimulación térmica con foco portátil se muestran en las Figuras VI.15 y VI.16 (defectos de tamaños 40x40 y 20x20 mm).

Estos resultados han sido obtenidos situando las probetas enfrentadas a la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m y a una distancia del foco portátil de 0,35 m. En estos ensayos se han tomado imágenes termográficas durante dos fases: en la fase de calentamiento con el foco encendido, durante 440'', y en la fase de enfriamiento tras apagar el foco, durante 714''. Todos los termogramas recogidos durante el ensayo se muestran en el Anejo 06.

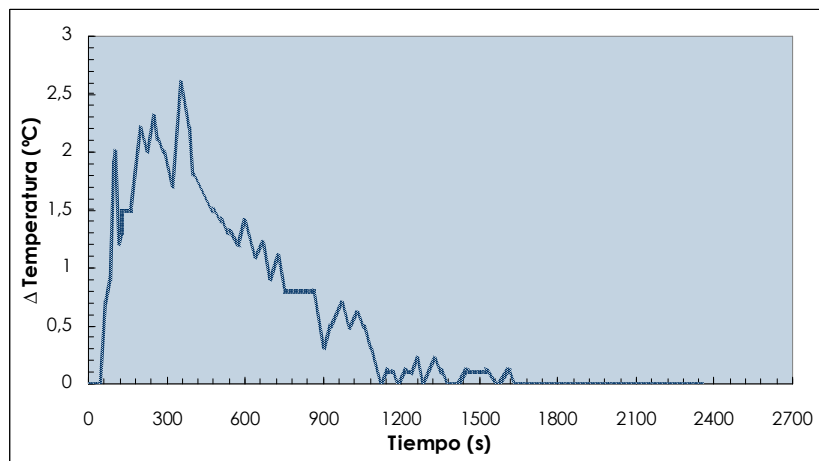
La temperatura ambiental del día del ensayo ha sido de 22°C.



Termografía activa (estimulación térmica en estufa):



**Figura VI.13.** Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.14.** Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica en estufa.

Matemáticamente las Figuras VI.13 y VI.14 quedan recogidas en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	(0 - 200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	0,82
	(200 - 2400 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	0,99
Defecto de 20x20 mm	(0 - 400 s)	$\Delta T = -3 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0168t - 0,2087$	0,84
	(400 - 1500 s)	$\Delta T = 9 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0031t + 2,7705$	0,94
	(1500 - 2400 s)	$\Delta T = 0$	-
Defecto de 10x10 mm	Sin resultados perceptibles		

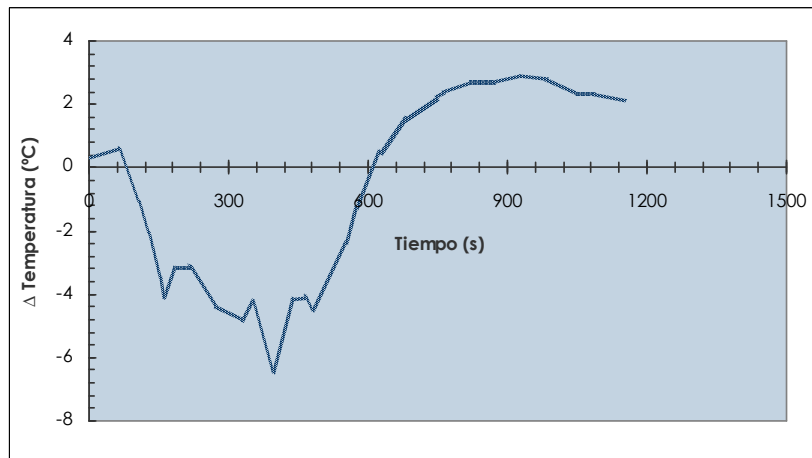
Siendo en cada caso;

- t      Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos , s.  
 $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto (Tª área sana de la probeta – Tª defecto) en grados centígrados, °C.

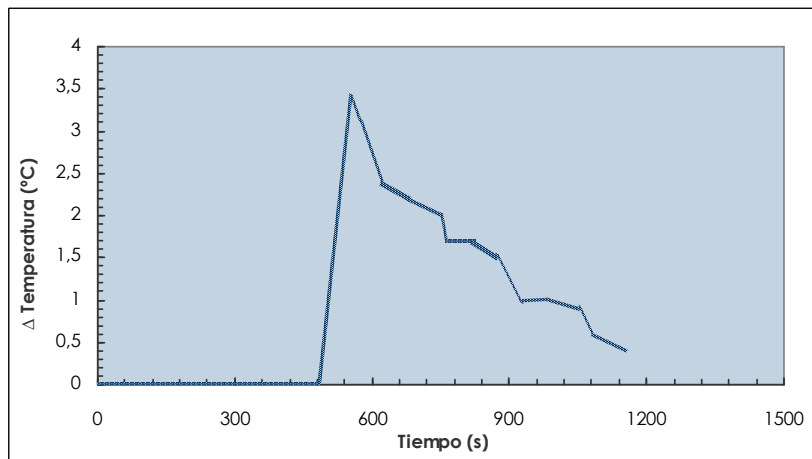
Analizando las Figuras VI.13 y VI.14 y las ecuaciones aportadas se extrae que los incrementos térmicos máximos para cada caso son:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . t = 150 s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max} = 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . t = 300 s.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max} = \text{sin variación térmica perceptible}$ .

Termografía activa (estimulación térmica con foco portátil):



**Figura VI.15.** Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco: 0,35 m.



**Figura VI.16.** Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos secos. Estimulación térmica con foco portátil. Distancia probetas-foco: 0,35 m.

Matemáticamente las Figuras VI.15 y VI.16 quedan recogidas en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	(0 - 600 s)	CALENT.	$\Delta T = 7 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0466t + 2,7347$	0,86
	(600 - 1400 s)	ENFR.	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0418t - 18,69$	0,94
Defecto de 20x20 mm	(0 - 600 s)	CALENT.	$\Delta T = 0$	-
	(600 - 1400 s)	ENFR.	$\Delta T = 5 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0123t + 8,5872$	0,97
Defecto de 10x10 mm	Sin resultados perceptibles			

Siendo en cada caso;

- t Tiempo durante la fase de calentamiento o enfriamiento en cada caso en segundos, s.
- $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C.

Analizando las Figuras VI.15 y VI.16 y las ecuaciones aportadas se extrae que los incrementos térmicos máximos para cada caso son:

Fase de calentamiento:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$ .  $t = 350$  s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max} =$  sin variación térmica perceptible.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max} =$  sin variación térmica perceptible.

Fase de enfriamiento:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 3,15^{\circ}\text{C}$ .  $t = 1050$  s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$ .  $t = 600$  s.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max} =$  sin variación térmica perceptible.

**VI.1.4.2. Defectos húmedos:**

Como en el ensayo de Detección de defectos internos en función de su profundidad, descrito en el Capítulo VI.1.3., en la segunda fase de este ensayo se ha realizado una termografía activa con el objetivo de cuantificar el incremento térmico producido por la humedad de los defectos.

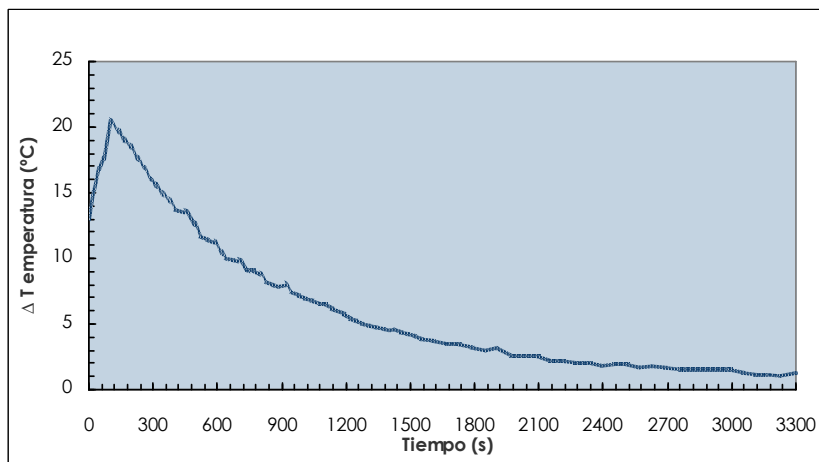
Los resultados obtenidos en esta fase se muestran en las Figuras VI.17, VI.18 y VI.19, para cada caso (defectos de tamaño 40x40, 20x20 y 10x10 mm). Los termogramas tomados durante el proceso se recogen en el Anejo 07.

Nuevamente estos resultados han sido obtenidos después de la estimulación térmica de las probetas en una estufa durante 45 minutos a 80 °C y tras realizar un seguimiento de su proceso de enfriamiento situando la cámara termográfica a una distancia de 1,20 m de las mismas.

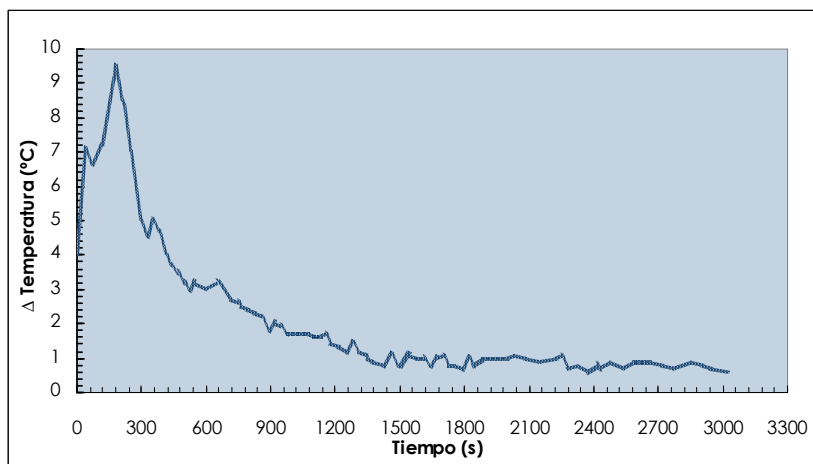
Las condiciones ambientales del día del ensayo han sido:

- Temperatura ambiente: 24°C
- Humedad relativa: 50%

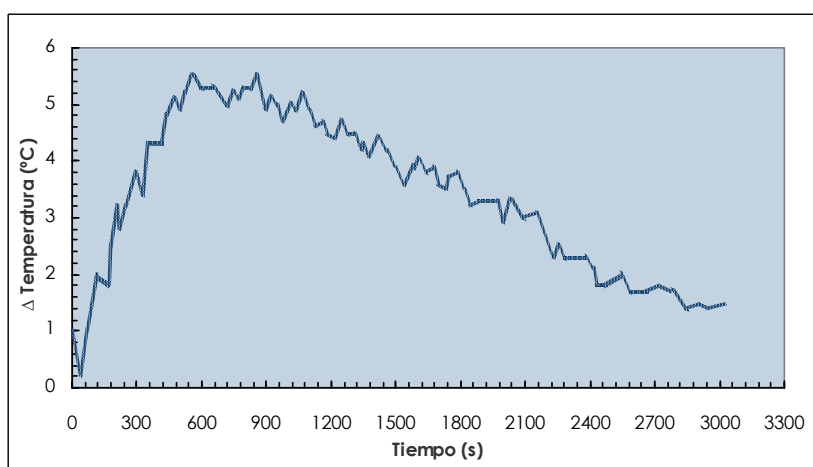
Termografía activa (estimulación térmica en estufa):



**Figura VI.17.** Defecto de 40x40 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.18.** Defecto de 20x20 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.



**Figura VI.19.** Defecto de 10x10 mm. Diferencia de temperatura entre la zona del defecto y el resto de la probeta. Defectos húmedos. Estimulación térmica en estufa.

Matemáticamente las Figuras VI.17, VI.18 y VI.19 quedan recogidas en las siguientes ecuaciones:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92$	0,96
	t (200 - 3000 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096$	0,97
Defecto de 20x20 mm	t (0 - 300 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0625t + 3,7586$	0,80
	t (300 - 3000 s)	$\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0039t + 5,5351$	0,90
Defecto de 10x10 mm	(0-800 s)	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,015t + 0,1746$	0,96
	t (800 - 3000 s)	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,002t + 6,9578$	0,97

siendo en cada caso;

t      Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C.

Analizando las Figuras VI.17, VI.18 y VI.19 y las ecuaciones aportadas se extrae que los incrementos térmicos máximos para cada caso son:

- Defectos de tamaño 40x40 mm:  $\Delta T_{\max} = 20^{\circ}\text{C}$ . t = 120 s.
- Defectos de tamaño 20x20 mm:  $\Delta T_{\max} = 9^{\circ}\text{C}$ . t = 150 s.
- Defectos de tamaño 10x10 mm:  $\Delta T_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$ . = 800 s.

**Discusión de resultados y conclusiones:**

De los ensayos realizados para la localización de defectos en función de su profundidad y/o su tamaño es posible concluir:

1. No es posible detectar a través de la *termografía pasiva*, bajo unas condiciones ambientales de 26°C y 51% de humedad relativa, un deterioro interno en una pieza de madera si su contenido de humedad es el mismo que el resto de la madera sana, independientemente de su tamaño y/o profundidad con respecto a la superficie. De esta forma confirmamos la hipótesis de otros investigadores como Maldague en cuya teoría afirmó “que los defectos secos no podían ser detectados con termografía”.
2. Es posible detectar a través de la *termografía activa mediante estimulación térmica en estufa* y en unas condiciones ambientales de 26°C y 51% de humedad relativa, defectos internos con un tamaño de 40x40 mm cuando éstos se sitúan a profundidades de hasta 15 mm y presentan el mismo contenido de humedad que el resto de la pieza. De esta forma, los incrementos térmicos máximos entre los defectos y las zonas sanas de las probetas oscilan entre 12°C, para los defectos más cercanos a la superficie (5 mm), y 1°C, para los defectos más profundos (15 mm). La posición en el tiempo de estos máximos, debido a la baja conductividad térmica de la madera, es más tardía conforme el defecto se aleja de la superficie variando desde los 150 s, para los defectos más cercanos, hasta los 1000 s, para los defectos más alejados de la superficie (Anejo 01). Por otro lado, se revela que, para una profundidad dada de 5 mm, es posible detectar defectos con un tamaño mínimo de 20x20 mm alcanzando una diferencia térmica máxima de 2,5°C (Anejo 05). Con todo ello se ratifican los resultados obtenidos por investigadores como Tanaka que lograron localizar defectos de hasta 15 mm de profundidad y 35 mm de diámetro. Las expresiones matemáticas obtenidas en estos procesos son las siguientes:

- Defectos situados a distintas profundidades:

<b>Defecto a 5 mm</b>	<b>t (0 - 200 s)</b>	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	<b>R<sup>2</sup>=0,82</b>
	<b>t [200 - 2700 s)</b>	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	<b>R<sup>2</sup>=0,99</b>
<b>Defecto a 10 mm</b>	<b>t (0 - 400 s)</b>	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0189t - 0,1121$	<b>R<sup>2</sup>=0,96</b>
	<b>t [400 - 2700 s)</b>	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0029t + 5,3487$	<b>R<sup>2</sup>=0,97</b>
<b>Defecto a 15 mm</b>	<b>t (0 - 400 s)</b>	$\Delta T = 0$	-
	<b>t (400 - 1200 s)</b>	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0041t - 1,3239$	<b>R<sup>2</sup>=0,75</b>
	<b>t (1200 - 2700 s)</b>	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0018t + 2,3258$	<b>R<sup>2</sup>=0,40</b>

- Defectos de distintos tamaños:

<b>Defecto de 40x40 mm</b>	<b>t (0 - 200 s)</b>	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	<b>R<sup>2</sup>=0,82</b>
	<b>t (200 - 2400 s)</b>	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	<b>R<sup>2</sup>=0,99</b>
<b>Defecto de 20x20 mm</b>	<b>t (0 - 400 s)</b>	$\Delta T = -3 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0168t - 0,2087$	<b>R<sup>2</sup>=0,84</b>
	<b>t (400 - 1500 s)</b>	$\Delta T = 9 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0031t + 2,7705$	<b>R<sup>2</sup>=0,94</b>
	<b>t (1500 - 2400 s)</b>	$\Delta T = 0$	-
<b>Defecto de 10x10 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		

Siendo en cada caso;

- t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 ΔT Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto (Tª área sana de la probeta – Tª defecto) en grados centígrados, °C



En todos los casos, la variación térmica obtenida,  $\Delta T$ , ( $T^a$  madera sana de la probeta –  $T^a$  "defecto") es positiva por lo que la temperatura superficial en la zona del "defecto" es siempre menor que la temperatura en el resto de la probeta. Así, dado que la temperatura superficial de la madera es función de sus propiedades térmicas (conductividad, calor específico y difusividad), análogas en todas las piezas, este hecho se explica a partir de la diferencia de espesores entre las zonas sanas y con "defectos" dentro de cada pieza. Este factor interviene directamente en la cantidad de calor conducido a través de ellas y conlleva que, en las zonas de menor espesor, el calor interior acumulado durante el calentamiento, se disipe más rápidamente para alcanzar la temperatura ambiente.

Si sustituimos la fuente de estimulación térmica por un foco portátil y en unas condiciones ambientales de 22 °C de temperatura, es posible detectar defectos de un tamaño de 40x40 mm situados a una profundidad máxima de 5 mm. En este caso, situando el foco de estimulación térmica a 0,70 m de las probetas, se alcanzan unas diferencias térmicas máximas de 2 °C en la fase de calentamiento y 1,7 °C en la fase de enfriamiento (Anejo 02). Si se acerca la posición del foco a 0,35 m, las diferencias térmicas aumentan hasta alcanzar los 3,30 °C en la fase de calentamiento y 4 °C en la fase de enfriamiento (Anejo 03). Los defectos situados a mayores profundidades resultan indetectables. Por otro lado, para una profundidad dada de 5 mm, es posible detectar defectos con un tamaño máximo de 20x20 mm. En este caso, situando el foco de estimulación a una distancia de 0,35 m de las probetas se alcanzan diferencias térmicas máximas de 5 °C en la fase de calentamiento, para los defectos de 40x40 mm, y 3 °C durante la fase de enfriamiento, tanto para los defectos de 40x40 mm como para los defectos de 20x20 mm (Anejo 06). Las expresiones matemáticas obtenidas en cada caso son las siguientes:

Foco situado a 0,70 m de las muestras:

- Defectos situados a distintas profundidades:

<b>Defecto a 5 mm</b>	<b>t (0 - 1000 s)</b>	<b><math>\Delta T = -1 \cdot 10^{-8}t^3 + 2 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0127t + 0,4918</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0,83</b>
	<b>t [1000 - 1800 s)</b>	<b><math>\Delta T = -5 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0149t - 9,3563</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0,72</b>
<b>Defecto a 10 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		
<b>Defecto a 15 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		

Foco situado a 0,35 m de las muestras:

- Defectos situados a distintas profundidades:

<b>Defecto a 5 mm</b>	<b>t (0 - 200 s)</b>	<b><math>\Delta T = 0</math></b>	<b>-</b>
	<b>t [200 - 800 s)</b>	<b><math>\Delta T = 3 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0296t + 3,9796</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0,88</b>
	<b>t [800 - 1600 s)</b>	<b><math>\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0250t - 11,50</math></b>	<b>R<sup>2</sup>=0,76</b>
<b>Defecto a 10 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		
<b>Defecto a 15 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		

- Defectos de distintos tamaños:

<b>Defecto de 40x40 mm</b>	<b>t (0 - 600 s)</b>	<b><math>\Delta T = 7 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0466t + 2,7347</math></b>	<b><math>R^2=0,86</math></b>
	<b>t (600 - 1400 s)</b>	<b><math>\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0418t - 18,69</math></b>	<b><math>R^2=0,94</math></b>
<b>Defecto de 20x20 mm</b>	<b>t (0 - 600 s)</b>	<b><math>\Delta T = 0</math></b>	<b>-</b>
	<b>t (600 - 1400 s)</b>	<b><math>\Delta T = 5 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0123t + 8,5872</math></b>	<b><math>R^2=0,97</math></b>
<b>Defecto de 10x10 mm</b>	<b>Sin resultados perceptibles</b>		

siendo en cada caso;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^a$  área sana de la probeta –  $T^a$  defecto) en grados centígrados, °C.

En estos casos, la variación térmica obtenida ( $T^a$  madera sana de la probeta –  $T^a$  “defecto”),  $\Delta T$ , es negativa durante la fase de calentamiento, es decir, la temperatura superficial en la zona del “defecto” es mayor que la temperatura en el resto de la probeta y positiva durante la fase de enfriamiento, es decir, la temperatura superficial en la zona del “defecto” es menor que la temperatura en el resto de la probeta.

Este modo de ensayo por reflexión plantea la dificultad de que el calentamiento de las piezas no es homogéneo sino que depende de la situación del foco con respecto a las piezas. Por otro lado, no se puede controlar la temperatura de estimulación aplicada sino que debe variarse la distancia del foco con respecto a las probetas. Es por esto que los ensayos se plantearon en dos fases (70 y 35 cm). En el primer caso, la distancia ha resultado excesiva por lo que los contrastes obtenidos han sido muy ligeros. Por el contrario, al disminuir la distancia a 35 cm se han alcanzado temperaturas tan altas en las probetas que podrían haber dañado la madera. Aún así, las diferencias térmicas no se han acentuado significativamente.

- Es posible detectar, a través de la *termografía activa* y para unas condiciones ambientales de 24°C y 50% de humedad relativa, defectos internos con un tamaño de 40x40 mm cuando éstos se sitúan a una profundidad máxima de 15 mm y tienen un contenido de humedad superior al resto de la madera sana de la pieza. En este caso, los incrementos térmicos máximos entre los defectos y las zonas sanas de las probetas oscilan entre 20°C, para los defectos más cercanos a la superficie (5 mm), y 2°C, para los defectos más profundos (15 mm). La posición en el tiempo de estos máximos es más tardía conforme el defecto se aleja de la superficie variando desde los 120 s, para los defectos más cercanos, hasta los 500 s, para los defectos más alejados de la superficie (Anejo 04). Por otro lado, se muestra que, para una profundidad de 5 mm, es posible detectar defectos de un tamaño mínimo de 10x10 mm con una diferencia térmica máxima de 6°C (Anejo 07). Como se puede observar, al incrementar el contenido de humedad en la zona con defectos, se acentúan las diferencias térmicas entre los defectos y las zonas sanas de las probetas, a la vez que se acelera la posición en el tiempo de estos incrementos térmicos máximos. Las expresiones matemáticas que resultan de cada uno de estos procesos son las siguientes:

- Defectos situados a distintas profundidades:

<b>Defecto a 5 mm</b>	<b>t (0 - 200 s]</b>	<b><math>\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92</math></b>	<b><math>R^2=0,96</math></b>
	<b>t (200 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096</math></b>	<b><math>R^2=0,97</math></b>
<b>Defecto a 10 mm</b>	<b>t (0 - 700 s]</b>	<b><math>\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0049t + 8,977</math></b>	<b><math>R^2=0,82</math></b>
	<b>t (700 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0049t + 9,3411</math></b>	<b><math>R^2=0,98</math></b>
<b>Defecto a 15 mm</b>	<b>t (0 - 1000 s]</b>	<b><math>\Delta T = 1 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,0011t + 1,7994</math></b>	<b><math>R^2=0,81</math></b>
	<b>t (1000 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 + 0,0003t + 0,9409</math></b>	<b><math>R^2=0,54</math></b>

- Defectos de distintos tamaños:

<b>Defecto de 40x40 mm</b>	<b>t (0 - 200 s]</b>	<b><math>\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92</math></b>	<b><math>R^2=0,96</math></b>
	<b>t (200 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096</math></b>	<b><math>R^2=0,97</math></b>
<b>Defecto de 20x20 mm</b>	<b>t (0 - 300 s]</b>	<b><math>\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0625t + 3,7586</math></b>	<b><math>R^2=0,80</math></b>
	<b>t (300 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0039t + 5,5351</math></b>	<b><math>R^2=0,90</math></b>
<b>Defecto de 10x10 mm</b>	<b>(0-800 s]</b>	<b><math>\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,015t + 0,1746</math></b>	<b><math>R^2=0,96</math></b>
	<b>t (800 - 3000 s)</b>	<b><math>\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,002t + 6,9578</math></b>	<b><math>R^2=0,97</math></b>

Siendo en cada caso;

- t      Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^\circ$  área sana de la probeta –  $T^\circ$  defecto) en grados centígrados,  $^\circ\text{C}$ .

Como en el ensayo anterior para el caso de estimulación térmica en estufa, en todos los casos, la variación térmica obtenida ( $T^\circ$  madera sana de la probeta –  $T^\circ$  "defecto"),  $\Delta T$ , es positiva por lo que la temperatura superficial en la zona del "defecto" es siempre menor que la temperatura en el resto de la probeta. Asimismo, la acentuación de las diferencias térmicas máximas es provocada por el efecto de enfriamiento evaporativo del agua que conlleva que en los instantes iniciales, en las zonas humedecidas se produzca una bajada brusca de temperatura. Seguidamente, tras esta bajada inicial de temperatura, podemos apreciar que las zonas humedecidas disipan el calor más lentamente que la masa seca de la probeta. Este hecho se explica por el efecto que produce el agua sobre las propiedades térmicas de la madera, incrementando su calor específico, lo que implica que las zonas humedecidas retengan el calor durante más tiempo que la madera seca.

### VI.1.5. DETECCIÓN DE GALERÍAS INTERNAS EN LA MADERA

Dado que uno de los objetivos propuestos es poder localizar pérdidas de densidad internas provocadas por agentes bióticos (tales como termitas), hemos tallado varias probetas donde se ha simulado este tipo de deterioro mediante la perforación de galerías de 6 mm de diámetro. Las piezas, de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L), tienen unas dimensiones de 45x75x45 mm y, agrupadas en dos series representan, dos casuísticas posibles:

- Distinta profundidad del daño con respecto a la superficie.
- Variación en la intensidad o grado del mismo.

Para realizar el ensayo se han colocado las probetas por series de perfil. El objetivo es simular la sección de una viga de madera en la que existen galerías longitudinales provocadas por un ataque de insectos xilófagos, por ejemplo termitas. El ensayo se ha realizado en termografía activa para lo cual se han introducido las probetas en la estufa durante 30 minutos a 80 °C. Posteriormente, se hace el seguimiento del proceso de enfriamiento durante 30 minutos tomando imágenes cada 30 segundos. Las condiciones ambientales de realización del ensayo han sido:

- Temperatura 20°C.
- Humedad relativa 58%.

#### Discusión de resultados y conclusiones:

A pesar de utilizar *termografía activa*, en este ensayo no se han obtenido resultados reseñables. No se han apreciado diferencias térmicas entre las distintas zonas de las probetas independientemente de la profundidad a la que se sitúan las galerías y/o de su concentración. El pequeño diámetro de las mismas, 6 mm, da lugar a que no se produzcan diferencias térmicas significativas. Esto ratifica los ensayos anteriores para las probetas con un tamaño de perforación de 10x10 mm en las que el contraste era mínimo o imperceptible.

## **VI.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

---

### **VI.2.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA**

#### **VI.2.1.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL**

#### **VI.2.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS**

### **VI.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA**

## RESUMEN

Los resultados de este capítulo se exponen desglosados en dos grandes bloques, resultados de los ensayos sobre madera sana y resultados sobre madera deteriorada. A su vez, dentro de cada bloque, se presentan agrupados según los lotes de madera, estructurados en función del tamaño de sus piezas, probetas estructurales y pequeñas probetas, y de su especie, pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

En todos los casos la exposición de resultados se plantea como sigue:

- Resultados de las propiedades físicas de las piezas (densidad y contenido de humedad).
- Clasificación visual conforme a la norma UNE 56544:2007.
- Resultados de las velocidades de ultrasonidos en las 3 direcciones principales (longitudinal, tangencial y radial) a la posición de la fibra.
- Resultados de las propiedades mecánicas de las probetas (resistencia a flexión y módulo de elasticidad).
- Correlación de los resultados de ensayos destructivos y no destructivos.

## VI.2.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

### VI.2.1.1. ENSAYOS SOBRE PROBETAS DE TAMAÑO ESTRUCTURAL

Los resultados de todos los ensayos (destructivos y no destructivos) realizados con probetas de tamaño estructural se recogen en los apartados sucesivos. Para estos ensayos se han utilizado los siguientes lotes de probetas:

Madera nueva:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )
<i>Pinus Sylvestris</i> L	45	50x50x1000
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	52	50x50x1000

Madera vieja:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )
<i>Pinus Sylvestris</i> L	37	50x50x1000

#### VI.2.1.1.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

El plan experimental de ensayos no destructivos ha englobado los siguientes ensayos:

- Determinación de las propiedades físicas (densidad y humedad).
- Clasificación visual según norma UNE 56544.
- Medición de la velocidad de transmisión de ultrasonidos en las direcciones normal, tangencial y longitudinal.

##### VI.2.1.1.1.1. Determinación de las propiedades físicas

Los resultados de las propiedades físicas de las probetas comprende la determinación de sus valores de densidad y humedad.

##### *Humedad*

La medición del contenido de humedad se ha realizado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002. Las mediciones son realizadas en dos fases, coincidiendo con la realización de los ensayos no destructivos (Fase 1) y posteriormente, con los ensayos destructivos (Fase 2). Los resultados son utilizados para referenciar los resultados de otras variables como la densidad o la velocidad de ultrasonidos a un contenido de humedad de referencia.

##### *Densidad*

Se ha determinado la densidad de cada probeta como el resultado de la relación entre la masa y el volumen de las mismas. Esta magnitud está condicionada por el contenido de humedad, por lo que, para poder comparar cuantitativamente los resultados se han referido todos los valores a un contenido de humedad único, 12% ( $D_{12\% \text{HUMEDAD}}$ ) aplicando la corrección establecida en la norma UNE 384:2010. Esta norma especifica: "Cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad".

Todos los resultados se recogen en las Tablas VI.3., VI.4. y VI.5.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

**Tabla VI.3.** Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m³) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m³)
1	558,82	(7,50)	561,07
2	614,26	(7,23)	616,65
3	548,31	(7,73)	550,45
4	628,40	(6,55)	631,13
5	426,81	(8,46)	428,58
6	521,56	(7,37)	523,87
7	476,25	(7,80)	478,35
8	594,48	(6,94)	597,01
9	650,11	(6,91)	652,66
10	453,44	(7,68)	455,60
11	522,59	(7,91)	524,64
12	467,37	(7,83)	469,37
13	459,54	(6,81)	462,14
14	615,24	(6,90)	617,79
15	505,58	(7,72)	507,71
16	570,63	(7,51)	572,87
17	570,84	(9,06)	572,30
18	543,73	(8,61)	545,42
19	624,19	(6,85)	626,77
20	642,02	(6,63)	644,70
21	656,19	(6,40)	658,99
22*	--	--	--
23	574,95	(8,22)	576,84
24	602,80	(6,40)	605,60
25	576,32	(7,30)	578,67
26	612,53	(7,82)	614,62
27	565,60	(7,13)	568,03
28	448,22	(7,37)	450,53
29	604,12	(7,03)	606,60
30	545,33	(7,36)	547,65
31	633,11	(7,98)	635,12
32	561,96	(6,93)	564,49
33	459,08	(7,11)	461,52
34	480,10	(7,68)	482,26
35	541,27	(7,21)	543,66
36	417,18	(6,70)	419,83
37	491,61	(6,83)	494,19
38	508,99	(7,23)	511,37
39	540,29	(7,13)	542,72
40	566,42	(6,96)	568,94
41	430,27	(7,27)	432,63
42	489,66	(6,56)	492,38
43	605,79	(7,12)	608,23
44	592,28	(7,50)	594,53
45	548,96	(6,76)	551,58

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Valor más alto	Densidad media (Kg/m³)	Densidad caract. (Kg/m³)
	Valor más bajo		
44	658,99 (prob. 21)	548,86	475,19
	419,83 (prob. 36)		

\* Los datos de la probeta 22 no pudieron ser tomados.



**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.4.** Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> ) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )
1	614,42	(8,51)	616,17
2	606,54	(8,30)	608,39
3	643,54	(10,19)	644,44
4	611,36	(10,48)	612,12
5	624,96	(6,88)	627,52
6	584,06	(8,53)	585,80
7	668,37	(9,49)	669,62
8	617,64	(8,50)	619,39
9	633,46	(8,23)	635,34
10	612,14	(9,08)	613,60
11	681,26	(8,89)	682,82
12	605,50	(9,51)	606,74
13	628,74	(10,16)	629,66
14	611,84	(8,99)	613,35
15	638,82	(9,86)	639,89
16	657,11	(8,60)	658,81
17	588,30	(10,11)	589,24
18	647,37	(8,05)	649,34
19	650,99	(8,54)	652,72
20	672,05	(10,83)	672,64
21	584,25	(10,45)	585,03
22	614,04	(9,40)	615,34
23	632,87	(9,85)	633,95
24	654,75	(9,31)	656,10
25	669,33	(8,89)	670,89
26	663,98	(9,01)	665,48
27	645,80	(8,74)	647,43
28	587,03	(9,73)	588,17
29	565,86	(10,71)	566,50
30	603,66	(8,43)	605,44
31	567,67	(9,10)	569,12
32	577,50	(8,73)	579,14
33	570,94	(9,01)	572,43
34	589,72	(8,86)	591,29
35	600,81	(9,16)	602,23
36	553,55	(9,20)	554,95
37	546,44	(10,33)	547,28
38	689,77	(9,44)	691,05
39	669,17	(9,36)	670,49
40	695,38	(8,76)	697,00
41	678,88	(8,58)	680,59
42	664,88	(10,36)	665,70
43	604,95	(8,99)	606,45
44	592,12	(10,50)	591,87
45	587,26	(8,53)	588,99
46	616,39	(10,24)	617,27
47	622,14	(8,70)	623,79
48	605,05	(8,73)	606,69
49	607,61	(9,44)	608,89
50	635,12	(8,95)	636,65
51	632,48	(10,30)	633,33
52	647,91	(10,24)	648,79

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Valor más alto	Densidad media (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad caract. (Kg/m <sup>3</sup> )
	Valor más bajo		
52	696,99 (prob. 21)	623,96	564,28
	547,27 (prob. 36)		

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

**Tabla VI.5.** Densidad, contenido de humedad (fase 1) y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> ) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )
1	542,48	(7,38)	544,78
2	533,28	(7,61)	535,47
3	486,00	(9,43)	487,28
4	422,48	(11,03)	422,96
5	409,76	(10,58)	410,46
6	454,72	(10,46)	455,48
7	493,28	(10,02)	494,26
8	453,60	(10,68)	454,25
9	430,00	(11,06)	430,46
10	637,56	(8,83)	639,14
11	598,56	(10,07)	599,52
12	597,92	(9,25)	599,29
13	629,40	(9,25)	630,77
14	590,84	(10,27)	591,70
15	617,52	(9,57)	618,73
16	570,48	(11,56)	570,69
17	629,16	(8,21)	631,05
18	433,24	(9,40)	434,54
19	443,92	(10,57)	444,63
20	482,12	(10,01)	483,11
21	458,88	(8,95)	460,40
22	495,84	(10,47)	496,60
23	503,28	(9,13)	504,71
24	443,60	(9,17)	445,01
25	449,16	(11,11)	449,60
26	505,72	(9,08)	507,17
27	480,24	(10,47)	481,00
28	438,92	(9,65)	440,09
29	482,64	(10,17)	483,55
30	495,92	(9,12)	497,35
31	497,68	(8,91)	499,22
32	460,36	(11,7)	460,51
33	496,08	(8,76)	497,69
34	490,88	(11,47)	491,14
35	533,36	(8,71)	535,00
36	488,72	(10,48)	489,47
37	529,80	(9,10)	531,25

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Valor más alto	Densidad media (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad caract. (Kg/m <sup>3</sup> )
	Valor más bajo		
37	639,14 (prob. 10)	502,92	428,96
	410,46 (prob. 5)		

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Considerando los valores de densidad del lote madera nueva de pino laricio frente a los lotes de madera de pino silvestre es posible concluir que esta madera es más pesada (mayor densidad) que la madera de pino silvestre. Estos resultados confirman las afirmaciones realizadas por otros autores (Fernández-Golfín et al., 2001) en las que mantienen que la madera de pino laricio es “más pesada que las restantes coníferas españolas”. Estos autores apuntan que esta madera es un 20% más pesada que la madera de pino silvestre. Los resultados obtenidos en esta investigación apuntan a que la madera nueva de pino laricio es un 15% más densa que la madera nueva de pino silvestre y un 25% más densa que la madera vieja de pino silvestre, lo cual confirma (en valor medio) los resultados de estos autores.

	<b>MADERA NUEVA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	<b>MADERA NUEVA</b> <b>Pino laricio</b> <b>(<i>Pinus Nigra</i> Arnold)</b>
<b>Nº probetas</b>	45	52
<b>Valor de densidad más bajo</b>	419,83	547,27
<b>Valor de densidad más alto</b>	658,99	696,99
<b>Densidad media</b>	548,86	623,96
<b>Densidad característica</b>	475,19	564,28
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	12,07	5,85

	<b>MADERA VIEJA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	<b>MADERA NUEVA</b> <b>Pino laricio</b> <b>(<i>Pinus Nigra</i> Arnold)</b>
<b>Nº probetas</b>	37	52
<b>Valor de densidad más bajo</b>	410,46	547,27
<b>Valor de densidad más alto</b>	639,14	696,99
<b>Densidad media</b>	502,92	623,96
<b>Densidad característica</b>	428,96	564,28
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	12,67	5,85

2. El análisis de la densidad de los lotes de madera de pino silvestre demuestra la proximidad de sus valores, lo que indica que la madera, si se conserva sana, mantiene sus propiedades físicas a lo largo del tiempo.

	<b>MADERA NUEVA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	<b>MADERA VIEJA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>
<b>Nº probetas</b>	45	37
<b>Valor de densidad más bajo</b>	419,83	410,46
<b>Valor de densidad más alto</b>	658,99	639,14
<b>Densidad media</b>	548,86	502,92
<b>Densidad característica</b>	475,19	428,96
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	12,07	12,67

### VI.2.1.1.2. Clasificación visual según norma UNE 56544:2007.

La clasificación visual conforme a la norma UNE 56544:2007 distingue entre las clases ME-1 y ME-2. Para ello evalúa una serie de singularidades o defectos de la madera de acuerdo al siguiente criterio:

**Tabla VI.6.** Criterios de medición de defectos y singularidades de la norma UNE 56544.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/5 \text{ "h"}$	$d \leq 1/2 \text{ "h"}$
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2 \text{ "b"}$ y $d \leq 30 \text{ mm}$	$d \leq 2/3 \text{ "b"}$
Anchura máxima del anillo de crecimiento			
- Pino silvestre		$\leq 4 \text{ mm}$	Sin limitación
- Pino laricio		$\leq 5 \text{ mm}$	Sin limitación
Fendas		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
	De secado	Las fendas de secado solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dos dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.	
	Rayo Heladura Abatimiento	No permitidas	
Acebolladuras		No permitidas	
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5 "h".	
Madera de compresión		Admisible en 1/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza.	Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza.
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Gemas			
- Longitud		$\leq 1/4 \text{ de "L"}$	$\leq 1/3 \text{ de "L"}$
- Dimensión relativa		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Médula		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
Alteraciones biológicas			
- Muérdago		- No se admite	
- Azulado		- Se admite	
- Pudrición		- No se admite	
- Galerías insectos xilófagos		- No se admite	
Deformaciones máximas			
- Curvatura de cara		10 mm (para 2 m de longitud)	20 mm (para 2 m de longitud)
- Curvatura de canto		8 mm (para 2 m de longitud)	12 mm (para 2 m de longitud)
- Alabeo		1 mm (por cada 25 mm de h) (por 2 m de longitud)	2 mm (por cada 25 mm de h) (para 2 m de longitud)
- Abarquillado		1/25 de "h"	1/25 de "h"

En las Tablas VI.7, VI.8 y VI.9 se recoge un resumen del proceso de medición de defectos desarrollado en los Anejos 08, 09 y 10.

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.7.** Clasificación visual de las probetas de madera nueva:  
especie *Pinus Sylvestris* L.

Nº PROBETA	CLASIFICACIÓN	DEFECTO EXCLUYENTE
1	ME-1	-
2	ME-1	-
3	ME-1	-
4	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=12mm
5	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=12mm
6	ME-1	-
7	ME-1	-
8	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=12mm
9	ME-1	-
10	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=19mm
11	ME-1	-
12	ME-1	-
13	ME-1	-
14	ME-1	-
15	ME-1	-
16	ME-1	-
17	ME-1	-
18	ME-1	-
19	ME-1	-
20	ME-1	-
21	ME-2	-
22	--	-
23	ME-1	-
24	ME-1	-
25	ME-2	Nudo transversal, cara D, d=25mm
26	Rechazo	Nudo transversal, cara C, d=28mm
27	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=17mm
28	ME-2	Varios nudos, cara D
29	ME-1	-
30	ME-2	Nudo pasante, cara B, d=30mm
31	Rechazo	Nudo transversal, cara A, d=36mm
32	ME-1	-
33	ME-2	Varios nudos, cara C
34	Rechazo	Varios nudos, cara B
35	ME-1	-
36	ME-2	Nudo transversal, cara B, d=32mm
37	Rechazo	Nudo transversal, cara A, d=34mm
38	Rechazo	Nudo transversal, cara D, d=28mm
39	ME-2	Varios nudos, caras A y D
40	Rechazo	Nudo transversal, cara C, d=36mm
41	Rechazo	Varios nudos, cara A
42	Rechazo	Varios nudos, cara A y B
43	Rechazo	Nudo transversal, cara A, d=29mm
44	ME-2	Varios nudos, caras A y C
45	ME-1	-

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Nº probetas ME-1	Nº probetas ME-2	Nº probetas RECHAZO
44	22 (50,00%)	13 (29,54%)	9 (20,45%)

**Tabla VI.8.** Clasificación visual de las probetas de madera nueva:  
especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	CLASIFICACIÓN	DEFECTO EXCLUYENTE
1	ME-1	-
2	ME-1	-
3	ME-1	-
4	ME-1	-
5	ME-1	-
6	ME-1	-
7	ME-1	-
8	ME-1	-
9	ME-1	-
10	ME-1	-
11	ME-1	-
12	ME-1	-
13	ME-1	-
14	ME-1	-
15	ME-1	-
16	ME-1	-
17	ME-1	-
18	ME-1	-
19	ME-1	-
20	ME-1	-
21	ME-1	-
22	ME-1	-
23	ME-1	-
24	ME-1	-
25	ME-1	-
26	ME-1	-
27	ME-1	-
28	ME-1	-
29	ME-1	-
30	ME-1	-
31	ME-1	-
32	ME-1	-
33	ME-1	-
34	ME-1	-
35	ME-1	-
36	ME-1	-
37	ME-1	-
38	ME-1	-
39	ME-1	-
40	ME-1	-
41	ME-1	-
42	ME-1	-
43	ME-1	-
44	ME-1	-
45	ME-1	-
46	ME-1	-
47	ME-1	-
48	ME-1	-
49	ME-1	-
50	ME-1	-
51	ME-1	-
52	ME-2	Nudo transversal, cara B, d=34 mm

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Nº probetas ME-1	Nº probetas ME-2	Nº probetas RECHAZO
52	51 (98 %)	1 (2%)	-

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.9.** Clasificación visual de las probetas de madera vieja:  
especie *Pinus Sylvestris* L.

Nº PROBETA	CLASIFICACIÓN	DEFECTO EXCLUYENTE
1	ME-1	-
2	ME-2	Nudo saltadizo, cara A, d=18mm
3	ME-2	Varios nudos, caras B, C y D
4	Rechazo	Varios nudos, caras C y D
5	Rechazo	Nudo adherente, cara A, d=30mm
6	ME-2	Varios nudos, caras A y C
7	Rechazo	Nudo saltadizo, cara C, d=38mm
8	Rechazo	Nudo saltadizo, cara A, d=40mm
9	Rechazo	Varios nudos, cara A
10	ME-1	-
11	ME-1	-
12	ME-1	-
13	ME-2	Nudo saltadizo, cara A, d=24mm
14	ME-2	Varios nudos, caras C
15	ME-2	Varios nudos, caras A
16	ME-2	Nudo transversal, cara C, d=14mm
17	ME-1	-
18	ME-2	Nudo transversal, cara A, d=22mm
19	Rechazo	Nudo pasante, cara A, d=50mm
20	ME-1	-
21	ME-2	Nudo saltadizo, cara A, d=14mm
22	Rechazo	Nudo adherente, cara B, d=43mm
23	ME-2	Nudo adherente, cara A, d=20mm
24	Rechazo	Nudo saltadizo, cara B, d=40mm
25	ME-1	-
26	ME-2	Nudo saltadizo, cara A, d=20mm
27	ME-1	-
28	ME-1	-
29	ME-1	-
30	ME-1	-
31	ME-1	-
32	ME-1	-
33	Rechazo	Nudo saltadizo, cara A, d=34mm
34	ME-1	-
35	Rechazo	Varias fendas cara B
36	ME-1	-
37	ME-1	-

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Nº probetas ME-1	Nº probetas ME-2	Nº probetas RECHAZO
37	16 (43,24%)	11 (29,72%)	10 (27,02%)

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Con los datos obtenidos, densidad y calidad visual, pueden deducirse los valores de densidad media y característica asignados a cada uno de los lotes, constituidos en función de la calidad visual de las piezas como ME-1, ME-2 y R. La Tabla VI.8, mostrada a continuación, recoge estos resultados para los lotes de madera nueva así como la clase resistente asignada por la norma de clasificación visual UNE 56544 para cada una de las calidades y especies.

**Tabla VI.10.** Densidades, media y característica, de las probetas de madera nueva en función de su clasificación visual y especie.

<b>Especie</b>	<b>MADERA NUEVA Pino silvestre (<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	<b>MADERA NUEVA Pino laricio (<i>Pinus Nigra</i> Arnold)</b>
<b>Nº probetas</b>	45	52
<b>Valor de densidad más bajo</b>	419,83	547,27
<b>Valor de densidad más alto</b>	658,99	696,99
<b>Densidad media</b>	548,86	623,96
<b>Densidad característica</b>	475,19	564,28
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	12,07	5,85
<b>Nº probetas ME-1 (UNE 56544)</b>	22	51
<b>Valor de densidad más bajo</b>	462,14	547,28
<b>Valor de densidad más alto</b>	658,99	697
<b>Densidad media</b>	566,71	623,96
<b>Desviación típica</b>	55,47	36,16
<b>Densidad característica</b>	475,19	564,28
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	9,78	5,79
<b>Clase resistente asignada a la especie para calidad ME-1 (UNE 56544)</b>	<b>C27</b>	<b>C30</b>
<b>Nº probetas ME-2 (UNE 56544)</b>	13	--
<b>Valor de densidad más bajo</b>	419,83	--
<b>Valor de densidad más alto</b>	631,13	--
<b>Densidad media</b>	522,98	--
<b>Desviación típica</b>	71,61	--
<b>Densidad característica</b>	404,82	--
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	13,69	--
<b>Clase resistente asignada a la especie para calidad ME-2 (UNE 56544)</b>	<b>C18</b>	--
<b>Nº probetas RECHAZO (UNE 56544)</b>	9	--
<b>Valor de densidad más bajo</b>	432,63	--
<b>Valor de densidad más alto</b>	614,62	--
<b>Densidad media</b>	530,41	--
<b>Desviación típica</b>	58,81	--
<b>Densidad característica</b>	433,37	--
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	11,08	--



**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

La Tabla VI.11., mostrada a continuación, compara las densidades, media y característica, de los lotes de madera (nueva y vieja) de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Estos lotes están establecidos según los criterios de calidad visual definidos en la norma UNE 56544:2007 como ME-1, ME-2 y R. Asimismo, se recoge la clase resistente asignada por la norma a esta especie según su calidad visual.

**Tabla VI.11.** Densidades, media y característica, de las probetas de madera nueva y vieja de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) en función de su clasificación visual.

	<b>MADERA VIEJA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	<b>MADERA NUEVA</b> <b>Pino silvestre</b> <b>(<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>
<b>Nº probetas</b>	37	45
<b>Valor de densidad más bajo</b>	410,46	419,83
<b>Valor de densidad más alto</b>	639,14	658,99
<b>Densidad media</b>	502,92	548,86
<b>Densidad característica</b>	428,96	475,19
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	12,67	12,07
<b>Nº probetas ME-1</b> <b>(UNE 56544)</b>	16 (43,24%)	22 (50,00%)
<b>Valor de densidad más bajo</b>	440,09	462,14
<b>Valor de densidad más alto</b>	639,14	658,99
<b>Densidad media</b>	520,00	566,71
<b>Desviación típica</b>	62,08	55,47
<b>Densidad característica</b>	417,56	475,19
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	12,07	9,78
<b>Clase resistente asignada a la especie para calidad ME-1 (UNE 56544)</b>	<b>C27</b>	<b>C27</b>
<b>Nº probetas ME-2</b> <b>(UNE 56544)</b>	11 (29,72%)	12 (29,54%)
<b>Valor de densidad más bajo</b>	434,54	419,83
<b>Valor de densidad más alto</b>	630,77	631,13
<b>Densidad media</b>	526,99	522,98
<b>Desviación típica</b>	64,60	71,61
<b>Densidad característica</b>	420,39	404,82
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	12,25	13,69
<b>Clase resistente asignada a la especie para calidad ME-2 (UNE 56544)</b>	<b>C18</b>	<b>C18</b>
<b>Nº probetas RECHAZO</b> <b>(UNE 56544)</b>	10 (27,02%)	9 (20,45%)
<b>Valor de densidad más bajo</b>	410,46	432,63
<b>Valor de densidad más alto</b>	535,0	614,62
<b>Densidad media</b>	463,13	530,41
<b>Desviación típica</b>	38,28	58,81
<b>Densidad característica</b>	399,97	433,37
<b>Coeficiente de variación (%)</b>	8,26	11,08

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Según los criterios de calidad visual definidos en la norma UNE 56544 tenemos que:
  - a. En el lote de madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) el 50,00% de las piezas son de calidad ME-1, el 29,54% de calidad ME-2 y el 20,45% son piezas inadmisibles estructuralmente, es decir, Rechazo.
  - b. En el lote de madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) el 43,24% de las piezas son de calidad ME-1, el 29,72% son de calidad ME-2 y el 27,02% son piezas no admisibles para uso estructural, piezas Rechazo.
2. Para la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) la norma UNE 56544:2007 asigna a las piezas clasificadas como ME-1 la clase resistente C27 y para las piezas clasificadas como ME-2 la clase resistente C18. No obstante, según los valores de densidad obtenidos en el presente trabajo (densidades media y característica) es posible asignar en cada caso las siguientes clases resistentes:

CALIDAD VISUAL	CLASE RESISTENTE SEGÚN DENSIDAD	
	MADERA NUEVA Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	MADERA VIEJA Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)
ME-1	>C50	C40
ME-2	C35	C40
R	C40	C30

3. Asimismo, según los criterios de calidad visual de la norma UNE 56544 en el lote de madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) el 98% de las piezas son de calidad ME-1 y el 2% de calidad ME-2.
4. Para la especie *Pinus Nigra* Arnold la norma UNE 56544 asigna a las piezas clasificadas como ME-1 la clase resistente C30 y para las piezas clasificadas como ME-2 la clase resistente C18. Sin embargo, según los valores de densidad obtenidos, media y característica, para todas las calidades visuales, permiten asignar una clase resistente superior a C50.
5. Con estos resultados podemos concluir:
  - a. La asignación de clases resistentes según criterios de clasificación visual por la norma UNE 56544 es muy inferior a la clasificación obtenida en función de otros criterios como la densidad.
  - b. La densidad, junto con el módulo de rotura a la flexión (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (MOE) son las variables clasificatorias utilizadas por la norma UNE 338. No obstante, según la densidad se pueden obtener clases resistentes muy elevadas. En estos resultados coincidimos con otros autores (Acuña et al., 2006) que afirman que "la densidad siempre resulta apreciablemente mayor que la exigida en norma".
  - c. Son necesarios otros criterios, como los ensayos mecánicos, para poder estimar el rendimiento clasificatorio en cada caso. De esta manera coincidimos con otros investigadores (Acuña et al., 2006) que afirman que "la densidad no limita la calidad de la población".

### **VI.2.1.1.1.3. Medición de las velocidades de ultrasonidos**

Las medidas de transmisión de ultrasonidos están afectadas por una multiplicidad de factores (tipo de madera, densidad, humedad, posición de los anillos de crecimiento, dirección de la fibra, distancia entre los transductores) que condicionan las mediciones realizadas sobre cualquier elemento (Capítulo V). Esta situación origina que los resultados obtenidos en cada caso no sean comparables y que se requiera realizar un estudio individualizado de cada variable con dos objetivos fundamentales:

1. Cuantificar su grado de influencia en cada medición de ultrasonidos.
2. Establecer las correlaciones necesarias que permitan corregir las mediciones realizadas refiriéndolas a un valor de referencia.

Al trabajar con madera de una misma especie los factores "tipo de madera" y "densidad", se anulan, quedando por cuantificar el resto de parámetros.

En estudios precedentes realizados por este Grupo de Investigación (Rubio de Hita, 1997) se extrajeron las correlaciones necesarias para corregir los factores "humedad", "dirección de la fibra" y "posición de anillos de crecimiento" para la madera de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

En el presente trabajo se pretende cuantificar el grado de influencia de estas variables en las velocidades de transmisión para la madera de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y establecer las correlaciones propias para esta especie. Asimismo, se pretende determinar si es necesaria una discriminación entre ambas especies, pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

#### **A) Influencia de la humedad en las velocidades de transmisión en la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)**

Para estudiar la influencia de la humedad sobre las velocidades de transmisión se emplean 2 probetas de dimensiones 20x20x300 mm de madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Estas probetas se sumergen en agua hasta conseguir su saturación y, posteriormente, se extraen y se secan en estufa, según norma UNE-EN 13183-1:2002, hasta alcanzar el estado anhidro. Durante este proceso de secado, en diferentes instantes, se realizan mediciones de las velocidades de propagación en las direcciones longitudinal y perpendicular a la fibra.

Los datos recogidos durante el proceso de secado de las probetas 1 y 2 se muestran en las Tablas VI.12 y VI.13. Asimismo, para poder relacionar ya sea  $V_L$  o  $V_N$  con  $H$  hemos representado gráficamente el proceso en las Figuras VI.20 y VI.21 para la probeta 1, y VI.22 y VI.23 para la probeta 2. Finalmente, se representan los datos de las probetas 1 y 2 conjuntamente en las Figuras VI.24 y VI.25. En estas figuras, para poder caracterizar y cuantificar en cada caso la relación que existe entre la velocidad, normal o longitudinal, y la humedad hemos ajustado los valores de ensayo mediante rectas de regresión. No obstante, como podrá observarse, este ajuste no es posible mediante una única recta pues se produce un punto de inflexión en el valor de 28% de humedad (punto de saturación de las fibras), obteniéndose relaciones distintas según la humedad sea mayor o menor del 28%.

A partir de las correlaciones obtenidas en las Figuras VI.24 y VI.25, donde se han representado conjuntamente los datos de las probetas 1 y 2, es posible corregir las medidas de velocidad tomadas a humedades cualesquiera para referirlas a una humedad de referencia del 12% (humedad de equilibrio).

**Tabla VI.12.** Mediciones de velocidad de ultrasonidos longitudinal y normal durante el proceso de secado de la Probeta 1.

PROBETA N°	PESO (g)	HUMEDAD (%)	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>N</sub> (m/s)
1	120,57	97,66	4552,35	1309,52
	113,08	85,38	4552,35	1309,52
	107,33	75,95	4566,21	1333,33
	99,64	63,34	4601,23	1333,33
	91,85	50,57	4636,79	1349,69
	88,18	44,56	4672,90	1309,52
	82,88	35,87	4854,37	1309,52
	78,73	29,07	4958,68	1325,30
	76,09	24,74	5076,14	1366,46
	74,35	21,89	5136,99	1392,41
	73,63	20,70	5150,21	1456,95
	72,11	18,21	5203,82	1517,24
	70,79	16,05	5263,16	1571,43
	69,29	13,59	5328,60	1571,43
	67,81	11,16	5371,53	1617,65
	65,66	7,64	5439,71	1679,39
	64,43	5,62	5628,52	1746,03
	63,55	4,18	5649,72	1746,03
	62,51	2,48	5671,08	1760,00
	61,59	0,97	5769,23	1788,62

Peso seco de la probeta: 61,03 g.

Probeta 1:

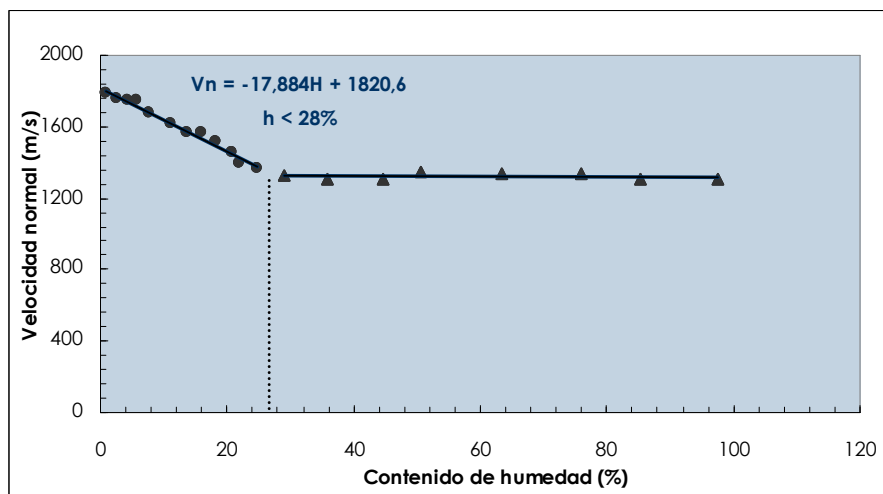


Figura VI.20. Probeta 1. Relación entre la velocidad normal y la humedad.

- $H < 28\%$

$$V_{n0} = 1820,6 \text{ m/s.} \quad V_{n28} = 1319,84 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 27,5 \%$$

- $H > 28\%$

$$V_{n28} = 1319,84 \text{ m/s.} \quad V_{n100} \approx 1319,84 \text{ m/s.} \quad \Delta V \approx 0 \%$$

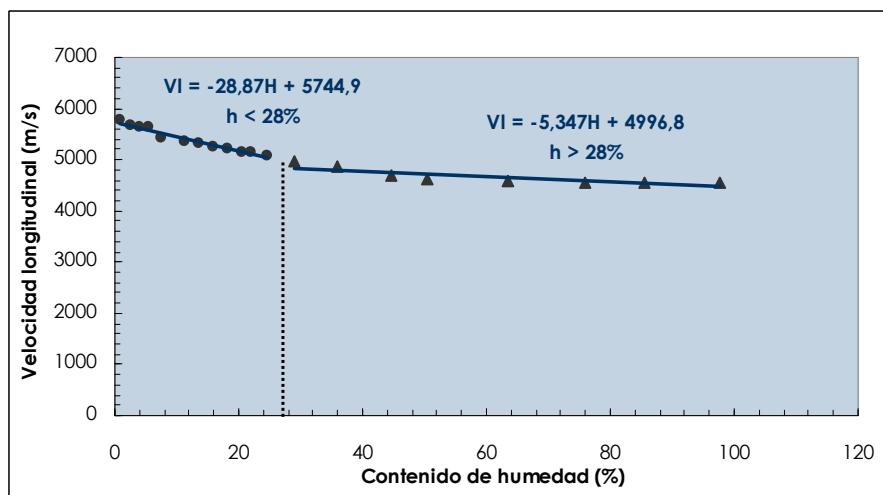


Figura VI.21. Probeta 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad.

- $H < 28\%$

$$V_{l0} = 5744,9 \text{ m/s.} \quad V_{l28} = 4936,54 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 14,1 \%$$

- $H > 28\%$

$$V_{l28} = 4847,08 \text{ m/s.} \quad V_{l100} = 4462,1 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 7,94 \%$$

**Tabla VI.13.** Mediciones de velocidad de ultrasonidos longitudinal y normal durante el proceso de secado de la Probeta 2.

PROBETA N°	PESO (g)	HUMEDAD (%)	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>N</sub> (m/s)
2	140,21	137,64	3807,11	1301,78
	133,55	126,36	3811,94	1286,55
	128,07	117,07	3841,23	1242,94
	120,2	103,73	3861,00	1202,19
	111,32	88,68	3989,36	1195,65
	104,64	77,36	4016,06	1170,21
	95,08	61,15	4103,97	1170,21
	84,98	44,03	4184,10	1182,80
	80,2	35,93	4285,71	1202,19
	77,35	31,10	4329,00	1222,22
	75,36	27,73	4411,76	1286,55
	72,92	23,59	4497,75	1392,41
	70,29	19,14	4709,58	1517,24
	68	15,25	4769,48	1549,30
	66,2	12,20	4838,71	1571,43
	63,77	8,08	5084,75	1594,20
	62,17	5,37	5244,76	1629,63
	61,28	3,86	5291,01	1679,39
	60,39	2,36	5328,60	1692,31
	59,77	1,31	5338,08	1705,43

Peso seco de la probeta: 59 g.

Probeta 2:

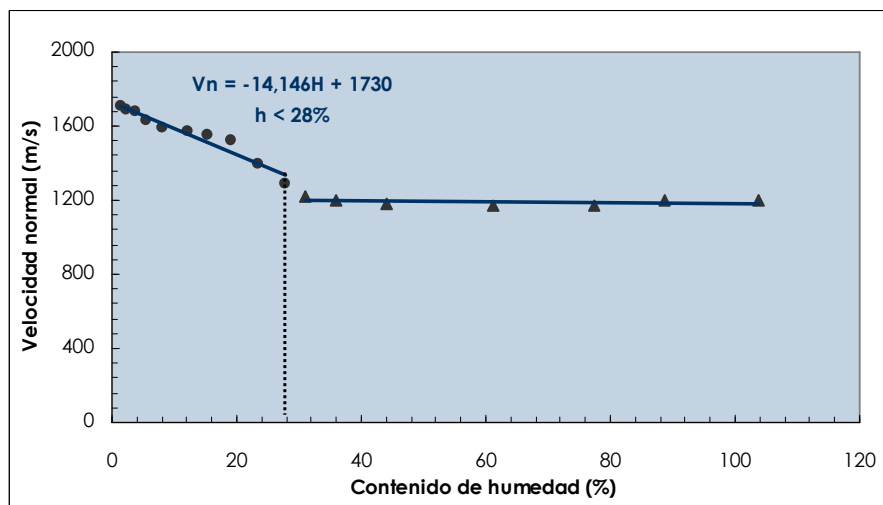


Figura VI.22. Probeta 2. Relación entre la velocidad normal y la humedad.

- $H < 28\%$

$$V_{n0} = 1730,00 \text{ m/s.} \quad V_{n28} = 1333,91 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 22,9 \%$$

- $H > 28\%$

$$V_{n28} = 1333,91 \text{ m/s.} \quad \Delta V \approx 0 \%$$

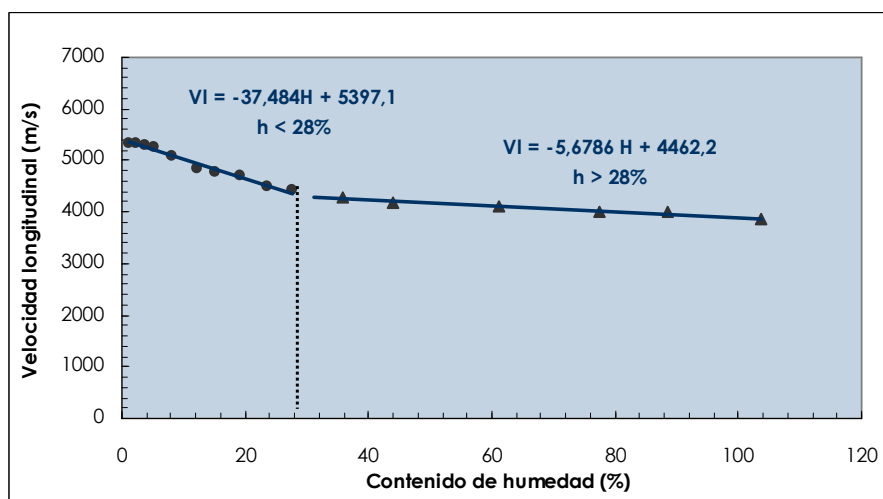


Figura VI.23. Probeta 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad.

- $H < 28\%$

$$V_{l0} = 5397,10 \text{ m/s.} \quad V_{l28} = 4347,54 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 19,4 \%$$

- $H > 28\%$

$$V_{l28} = 4303,19 \text{ m/s.} \quad V_{l100} = 3894,34 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 9,5 \%$$

Probetas 1 y 2:

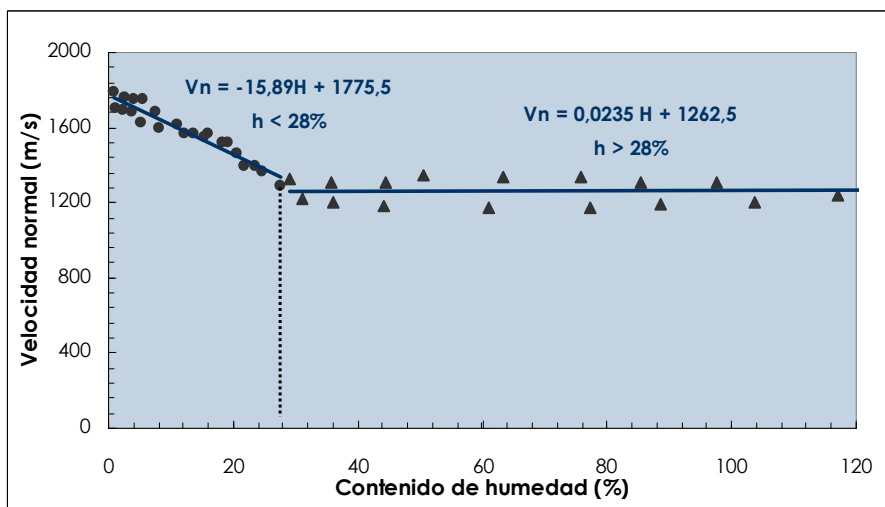


Figura VI.24. Probetas 1 y 2. Relación entre la velocidad normal y la humedad.

- H < 28%

$$V_{n0} = 1775,50 \text{ m/s.} \quad V_{n28} = 1330,58 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 25,0 \%$$

- H > 28%

$$V_{n28} = 1263,16 \text{ m/s.} \quad V_{n28} = 1264,85 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 0,1 \%$$

Probetas 1 y 2	H < 28%	H > 28%
Nº de puntos	22	16
Valor más bajo	1286,55	1222,22
Valor más alto	1788,62	1325,30
Media	1583,25	1260,51
Desviación típica	136,39	64,95
Coefficiente cuadrado de correlación ( $R^2$ )	0,93	Sin ajuste
Ecuación de la recta	$V_n = -15,89 H + 1775,5$	$V_n = 0,0235 H + 1262,5$
CORRECCIÓN HUMEDAD REFERENCIA (12%)	$V_{N12} = 15,89 (H_1 - 12) + V_1$	

Correcciones obtenidas para *Pinus Sylvestris* L (tesis Rubio de Hita):

	H < 28%	H > 28%
$\Delta V$	28,67%	1,69%
Coefficiente cuadrado de correlación ( $R^2$ )	0,71	0,08
Ecuación de la recta	$V_n = -27,57 H + 2692$	$V_n = 0,46 H + 1905$
CORRECCIÓN HUMEDAD REFERENCIA (12%)	$V_{N12} = 27,57 (H_1 - 12) + V_1$	$V_{N28} = -0,46 (H_1 - 28) + V_1$



Probetas 1 y 2:

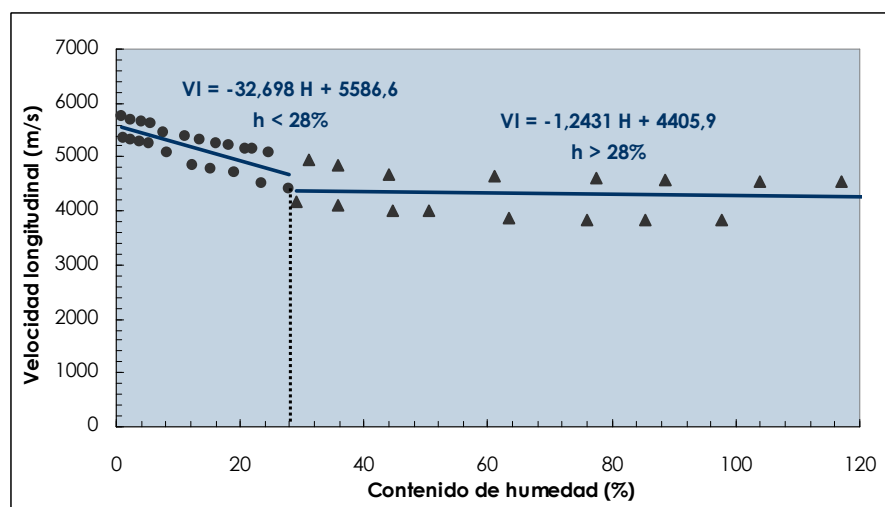


Figura VI.25. Probetas 1 y 2. Relación entre la velocidad longitudinal y la humedad.

- H < 28%

$$V_{l0} = 5586,60 \text{ m/s.} \quad V_{l28} = 4671,05 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 16,3 \%$$

- H > 28%

$$V_{l28} = 4371,09 \text{ m/s.} \quad V_{l12} = 4281,59 \text{ m/s.} \quad \Delta V = 2,05 \%$$

Probetas 1 y 2	H < 28%	H > 28%
Nº de puntos	22	16
Valor más bajo	4411,76	3836,317136
Valor más alto	5769,23	4958,68
Media	5191,05	4315,71
Desviación típica	356,07	360,31
Coeficiente cuadrado de correlación ( $R^2$ )	0,58	Sin ajuste
Ecuación de la recta	$VI = -32,698 H + 5586,6$	$VI = 1,2431 H + 4405,9$
CORRECCIÓN HUMEDAD REFERENCIA (12%)	$V_{L12} = 32,698 (H_1 - 12) + V_1$	

Correcciones obtenidas para *Pinus Sylvestris* L (tesis Rubio de Hita):

	H < 28%	H > 28%
$\Delta V$	18,22%	1,06%
Coeficiente cuadrado de correlación ( $R^2$ )	0,70	0,01
Ecuación de la recta	$V_n = -39,09 H + 6004,8$	$V_n = 0,73 H + 4864,2$
CORRECCIÓN HUMEDAD REFERENCIA (12%)	$V_{L12} = 39,09 (H_1 - 12) + V_1$	$V_{L12} = -0,73 (H_1 - 28) + V_1$

### B) Determinación de la posición de los anillos de crecimiento en la madera de pino laricio (Pinus Nigra Arnold). Coeficiente conversión a velocidad normal

Al realizar una medición de ultrasonidos en la sección de una viga, los valores que se obtienen dependen de la orientación de los anillos en la trayectoria tomada por el tren de ondas, dependiente de la situación de los transductores en la sección.

Como resultado, los valores de velocidad obtenidos en cada caso difieren siendo, por tanto, no comparables entre sí. Para que estas velocidades puedan ser comparadas es necesario referir todas las mediciones a una posición de fibra idéntica. Así, dado que en el sentido transversal, la orientación que mejor favorece la propagación del ultrasonido es la perpendicular, se elige esta orientación como patrón de comparación. En este capítulo trataremos de determinar qué coeficientes son necesarios para realizar la conversión de una velocidad cualquiera a velocidad normal (perpendicular).

Para ello se emplea el lote de 15 piezas de dimensiones 90x120x300 mm de madera sana, clasificadas en función de la posición de sus anillos.

1. Posición de fibra centrada.
2. Posición de fibra extrema.

El proceso seguido en cada caso es el siguiente:

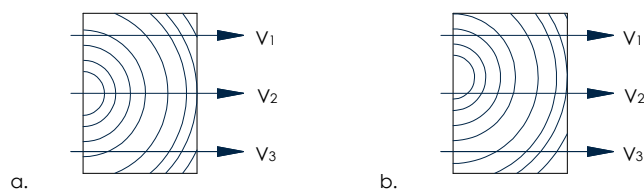
- En cada pieza se determina la velocidad normal real,  $V_{NR}$ . La velocidad normal real es la velocidad de ultrasonidos más perpendicular posible a los anillos de crecimiento medida en cualquier punto de la sección.
- Se miden las velocidades normales  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ . Estos valores se toman a 3 cm de los bordes de la pieza y en el centro.
- Se obtiene la  $V_m$  como media de las velocidades  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ .
- Se determina la relación existente entre  $V_{NR}/V_1$ ,  $V_{NR}/V_2$  y  $V_{NR}/V_3$ .
- De estas relaciones se obtienen los coeficientes  $C_1$  ( $V_{NR}/V_1$ ),  $C_2$  ( $V_{NR}/V_2$ ) y  $C_3$  ( $V_{NR}/V_3$ ).
- Multiplicando los valores de  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  por los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se obtienen  $V_1'$ ,  $V_2'$  y  $V_3'$ .
- Se obtiene  $V_m'$  como media de las velocidades  $V_1'$ ,  $V_2'$  y  $V_3'$ .
- La relación existente entre  $V_m'$  y  $V_m$  es el coeficiente corrector de la velocidad media.

Para ambas situaciones (posición de fibra centrada y posición de fibra extrema) se detalla todo este proceso a continuación:

## POSICIÓN DE FIBRA CENTRADA

Decimos que la posición de fibra es centrada cuando la trayectoria normal de los anillos está situada a  $h/2$ , siendo "h" la altura de la sección. Como consecuencia, cuando esto ocurre la mayor velocidad, en madera sana, corresponde a la zona central.

Dentro de este caso, la fibra principal puede presentar desplazamientos aun estando en la zona central, distinguiéndose los casos de posición de fibra central y central-extrema (Figura VI.26)



**Figura VI.26.** Posición de fibra centrada (a. Posición central, b. Posición central-extrema).

Para estudiar estos casos hemos elegido 11 probetas que abarcan ambas situaciones.

**Tabla VI.14.** Velocidades normales para posición de fibra centrada.

CASO	$V_{NR}$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_{NR}/V_1$	$V_{NR}/V_2$	$V_{NR}/V_3$
1	2158,27	1333,33	2158,27	1384,61	1,61	1	1,55
1	1956,52	1395,34	1935,48	1470,58	1,40	1,01	1,33
1	2325,58	1704,54	2200,48	1724,13	1,36	1,05	1,34
2	2195,12	1832,99	2102,80	1666,66	1,19	1,04	1,31
2	2331,60	1882,84	1973,68	1672,86	1,23	1,18	1,39
2	2393,61	1960,78	2393,61	1578,94	1,22	1,00	1,51
2	2331,60	2027,02	2227,72	1948,05	1,15	1,04	1,19
2	2142,85	1832,99	1871,10	1648,35	1,16	1,14	1,30
2	2250,00	2036,19	2153,11	1778,65	1,10	1,04	1,26
2	2168,67	1851,85	1995,56	1657,45	1,17	1,08	1,30
2	2200,48	1698,11	2147,97	1554,40	1,29	1,02	1,41
Valores medios					1,26	1,05	1,35

siendo;

$V_{NR}$  Velocidad normal real a los anillos de crecimiento de cada probeta en m/s.  
 $V_1, V_2, V_3$  Velocidades "normales" a los anillos de crecimiento en cada probeta en m/s.

Al dividir la velocidad normal real por las velocidades  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  se pretende obtener unos coeficientes tales que multiplicando por ellos obtengamos la velocidad normal. Estos coeficientes deben servir tanto para el caso de "posición central" como "posición central-extrema" cometiendo el mínimo error posible en la determinación de  $V_{NR}$ . De la condición de simetría se tiene que:  $(1,26 + 1,35)/2 = 1,325 = 1,33$

Considerando estos casos los coeficientes para las situaciones de fibra centrada son:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1,33 \\ C_2 &= 1,05 \\ C_3 &= 1,33 \end{aligned}$$

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Una vez obtenidos los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , se obtiene el coeficiente corrector de la velocidad media,  $C$ .

A partir de los valores referidos a la velocidad normal  $V_i'$ , se calcula la velocidad media,  $V_m'$ . La relación entre  $V_m'$  y  $V_m$  nos determina  $C$ . Posteriormente se compara  $V_m'$  con  $V_{NR}$  obteniendo el error cometido en cada caso.

**Tabla VI.15.** Determinación del coeficiente corrector de la velocidad media para posición de fibra centrada.

CASO	$V_1'$	$V_2'$	$V_3'$	$V_m'$	$V_m$	$C$	$V_{NR}$	ERROR (%)
1	1773,32	2159,32	1841,53	1924,72	1625,40	1,18	2158,27	10,82
1	1855,80	1936,53	1955,87	1916,06	1600,46	1,20	1956,52	2,07
1	2267,03	2201,53	2293,09	2253,88	1876,38	1,20	2325,58	3,08
2	2437,87	2103,85	2216,65	2252,79	1867,48	1,21	2195,12	2,63
2	2504,17	1974,73	2224,90	2234,60	1843,12	1,21	2331,60	4,16
2	2607,83	2394,66	2099,99	2367,49	1977,77	1,20	2393,61	1,09
2	2695,93	2228,77	2590,90	2505,20	2067,59	1,21	2331,60	7,45
2	2437,87	1872,15	2192,30	2167,44	1784,14	1,21	2142,85	1,15
2	2708,13	2154,16	2365,60	2409,29	1989,31	1,21	2250,00	7,08
2	2462,96	1996,61	2204,40	2221,32	1834,95	1,21	2168,67	2,43
2	2258,48	2149,02	2067,35	2158,28	1800,16	1,20	2200,48	1,92
Valor medio						1,20		

siendo;

$$V_1' = V_1 * C_1 \quad V_2' = V_2 * C_2 \quad V_3' = V_3 * C_3$$

$$V_m' = (V_1' + V_2' + V_3')/3$$

$$C = V_m' / V_m$$

donde;

$V_1, V_2, V_3$  Velocidades "normales" a los anillos de crecimiento en cada probeta en m/s.

$C_1, C_2, C_3$  Coeficientes correctores para la situación de fibra centrada.

$V_1', V_2', V_3'$  Velocidades corregidas en m/s.

$V_m$  Velocidad media en m/s.

$V_m'$  Velocidad media corregida en m/s.

$C$  Coeficiente corrector de la velocidad media.

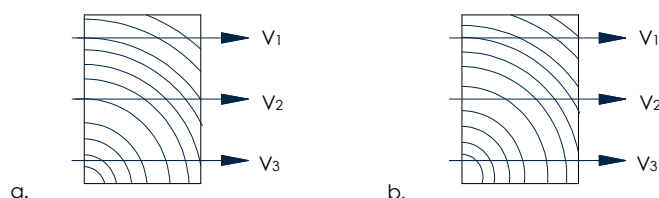
Al comparar  $V_m'$  con  $V_{NR}$  se obtiene el error cometido en cada caso:

- 72,72% de los casos es inferior al 5%.
- 18,18% de los casos es inferior al 8%.
- 9,09% de los casos es aproximadamente 10%.

## POSICIÓN DE FIBRA EXTREMA

Decimos que la posición de fibra es extrema cuando la trayectoria normal de los anillos está situada en el tercio superior o inferior de  $h$ , siendo " $h$ " la altura de la sección. Cuando esto ocurre, la mayor velocidad, en madera sana, corresponde con las trayectorias 1 ó 3.

Dentro de este caso, la fibra principal puede presentar desplazamientos aun estando en las zonas extremas, por lo que debe distinguirse los siguientes casos (Figura VI.27):



**Figura VI.27.** Casos de posición de fibra extrema (a. Posición extrema, b. Posición extrema-central).

Para estudiar estos casos hemos elegido 2 probetas cuya disposición de anillos responde a los casos mencionados.

**Tabla VI.16.** Velocidades normales para posición de fibra extrema.

CASO	$V_R$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_R/V_1$	$V_R/V_2$	$V_R/V_3$
1	2261,30	1463,41	1549,05	2017,93	1,54	1,45	1,12
2	2272,72	1546,39	1803,60	1931,33	1,46	1,26	1,17
Valor medio					1,50	1,35	1,14

siendo;

$V_R$  Velocidad normal real a los anillos de crecimiento de cada probeta en m/s.  
 $V_1, V_2, V_3$  Velocidades "normales" a los anillos de crecimiento en cada probeta en m/s.

En ambos casos el valor máximo corresponde a  $V_3$ .

Analizando estos valores tomamos como valores los coeficientes:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1,50 \\ C_2 &= 1,35 \\ C_3 &= 1,14 \end{aligned}$$

Obtenidos los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , se obtiene el coeficiente corrector de la velocidad media,  $C$ .

A partir de los valores referidos a la velocidad normal  $V_i'$ , se calcula la velocidad media,  $V_m'$ . La relación entre  $V_m'$  y  $V_m$  nos determina  $C$ . Posteriormente se compara  $V_m'$  con  $V_{NR}$  obteniendo el error cometido en cada caso.

**Tabla VI.17.** Determinación del coeficiente corrector de la velocidad media para posición de fibra extrema.

CASO	$V_1'$	$V_2'$	$V_3'$	$V_m'$	$V_m$	$C$	$V_{NR}$	ERROR (%)
1	2195,11	2091,21	2300,44	2195,59	1676,79	1,31	2261,30	2,91
1	2319,58	2434,86	2201,71	2318,72	1760,44	1,32	2272,72	2,02
Valor medio						1,315		

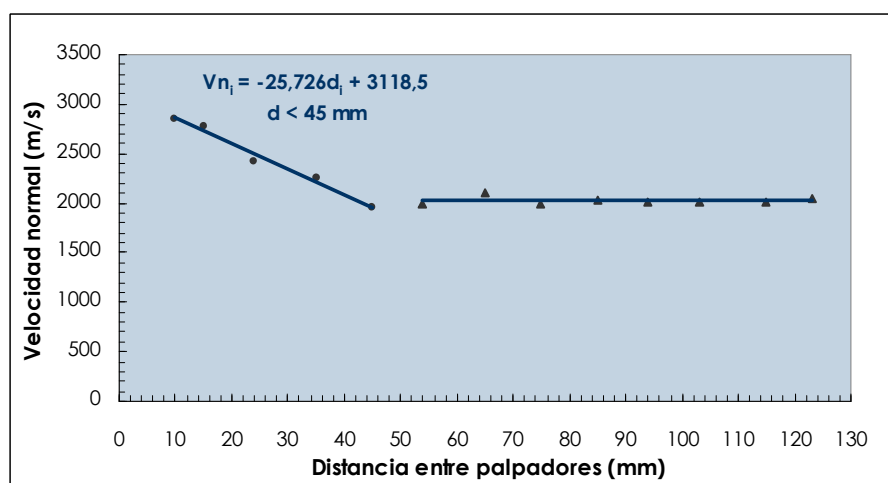
C) Influencia de la distancia entre transductores en la velocidad de transmisión ultrasónica en la dirección perpendicular a la fibra

Para definir la influencia de la distancia entre los transductores de ultrasonidos en la medición de las velocidades normales (perpendiculares) a la fibra, se emplean varias piezas extraídas de una misma viga de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Estas piezas tienen un espesor constante variando las dimensiones de su sección transversal. En cada pieza se realiza una única medida coincidiendo con la dirección perfectamente normal a la fibra para eliminar las dispersiones posibles. Los resultados obtenidos en cada pieza quedan reflejados en la Tabla VI.18:

**Tabla VI.18.** Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas.

MEDIDA N°	DIMENSIONES SECCIÓN (mm)	TIEMPO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD NORMAL DE ULTRASONIDOS (m/s)
1	123	60	2050,00
2	115	57	2017,54
3	103	51,2	2011,71
4	94	46,7	2012,84
5	85	41,8	2033,49
6	75	37,6	1994,68
7	65	30,8	2110,38
8	54	27	2000,00
9	45	23	1956,52
10	35	15,5	2258,06
11	24	9,9	2424,24
12	15	5,4	2777,77
13	1	3,5	2857,14

Como se observa, a partir de un determinado tamaño de sección, a medida que se reducen las dimensiones de la sección transversal aumenta significativamente la velocidad de ultrasonidos. La representación gráfica del fenómeno (Figura VI.28) permite cuantificar esta desviación y extraer las correlaciones necesarias para su corrección.



**Figura VI.28.** Relación de velocidades normales en cada una de las rebanadas.

Los resultados representados en la Figura VI.28 permiten determinar el grado de influencia de la distancia entre los palpadores sobre la velocidad normal. Se demuestra que la repercusión de la posición de los palpadores interviene para separaciones inferiores a 4,5 cm. Por encima de este valor los valores de velocidad obtenidos se mantienen constantes.

El resumen estadístico de la correlación obtenida:

Nº de valores	Ecuación de regresión	Correlación (R²)
5	$V_N = -25,726 d + 3118,5$	0,98

A partir de esta correlación es posible obtener el valor de la velocidad normal de piezas con escuadrías inferiores a 45 mm eliminando el efecto de la distancia entre transductores mediante la siguiente expresión:

$$V_N = 25,726 (D_1 - 45) + V_{N1}$$

donde,

$D_1$  Separación entre transductores (<45 mm) en milímetros, mm.

$V_{N1}$  Velocidad normal para la separación  $D_1$  en m/s.

La influencia de la distancia entre palpadores en la velocidad de ultrasonidos implica la necesidad de una revisión de todas las ecuaciones matemáticas aportadas para el diagnóstico de estructuras de madera por este Grupo de Investigación. El procedimiento experimental de estos trabajos está basado en el empleo de pequeñas probetas de 20x20x300 mm sin atender a la influencia de este parámetro sobre los resultados obtenidos.

#### D) Influencia de la dirección de la fibra en las velocidades de transmisión

Para estudiar la relación entre las distintas velocidades de transmisión en función de la dirección de la fibra hemos realizado, para una misma probeta, medidas en el sentido longitudinal, perpendicular y tangencial a la fibra. Los resultados y conclusiones de este capítulo se recogen en los apartados siguientes en las Tablas VI.19 a VI.30. Los valores aportados han sido corregidos y referidos a un contenido de humedad del 12% según las correlaciones obtenidas en capítulos anteriores.

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se han estudiado algunos de los parámetros intrínsecos de la madera que afectan a las velocidades de transmisión: humedad, posición de los anillos de crecimiento y dirección de la fibra. Asimismo, se ha estudiado la separación de los transductores como factor externo que influye sobre las velocidades.

Contenido de humedad:

2. Se ha determinado que las velocidades de transmisión de ultrasonidos, tanto en la dirección normal como paralela a fibra, están afectas por el contenido de humedad de la madera, conclusión en la que coincidimos con otros autores (Sandoz, 1989, Mishuri, 1996).
3. La influencia del contenido de humedad sobre las velocidades de transmisión es más importante para la dirección perpendicular a la fibra, velocidad normal, que para la velocidad en dirección paralela a la fibra, velocidad longitudinal.
4. En la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold), por debajo del 28% de contenido de humedad (punto de saturación de la fibra) se origina una variación de 25,0% en la velocidad normal y una variación de 16,3% para la velocidad longitudinal (en ambos casos para unos valores de humedad comprendidos entre 0 y 28%). Para referir todas las velocidades a un contenido de humedad de referencia, 12%, se proponen las siguientes ecuaciones:

Velocidad normal:  $V_{N12} = 15,89 (H_1 - 12) + V_1$

siendo;

$V_{N12}$  Velocidad normal al 12% de humedad en m/s.  
 $V_1$  Velocidad normal a una humedad  $H_1$  en m/s.

Velocidad longitudinal:  $V_{L12} = 32,698 (H_1 - 12) + V_1$

siendo;

$V_{L12}$  Velocidad longitudinal al 12% de humedad en m/s.  
 $V_1$  Velocidad longitudinal a una humedad  $H_1$  en m/s.

(Ecuaciones válidas para contenidos de humedad  $\leq 28\%$ )

Según otros autores (Rubio de Hita, 1997) para la especie de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) estas variaciones son similares aunque ligeramente superiores para esta especie, con un 28,7% en la velocidad normal y 18,22% en la velocidad longitudinal (ambos casos para contenidos de humedad entre 0 y 28%).

5. En la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold), por encima de un contenido de humedad del 28,0%, las velocidades de transmisión, tanto normal como longitudinal, se mantienen prácticamente constantes, con unas variaciones de 0,1% para la velocidad normal y 2,05% para la velocidad longitudinal (en ambos casos para contenidos de humedad entre 28% y 100%).

Posición de los anillos de crecimiento:

6. Se han determinado unos coeficientes para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold), coeficientes de conversión a velocidad normal, dependiendo de la posición de la fibra en cada caso, centrada o extrema. Estos coeficientes permiten corregir las velocidades normales para poder compararlas sin que intervenga la posición de la fibra.



7. Los coeficientes de conversión a normal son:

a. Posición de fibra centrada:

$$C_1 = 1,33$$

$$C_2 = 1,05$$

$$C_3 = 1,33$$

b. Posición de fibra extrema:

$$C_1 = 1,50$$

$$C_2 = 1,35$$

$$C_3 = 1,14$$

8. Para aplicar estos coeficientes es necesario conocer la posición de la fibra en la viga.

9. Se han determinado unos coeficientes correctores de la velocidad media dentro de una sección dependiendo de la posición de la fibra, centrada o extrema. Estos coeficientes permiten corregir la velocidad media dentro de una sección y aproximarla al valor de velocidad normal perfecta cometiendo un error inferior al 10%.

10. El valor de estos coeficientes son:

a. Posición de fibra centrada:

$$C = 1,20$$

b. Posición de fibra extrema:

$$C = 1,315$$

Distancia entre transductores:

11. La distancia entre los transductores de ultrasonidos interviene sobre los valores de la velocidad de ultrasonidos. En estos coincidimos con otros autores (Acuña et al., 2006). Estos autores sostienen que la distancia entre los transductores de ultrasonidos interviene sobre la velocidad de transmisión longitudinal a la fibra. En el presente trabajo se ha determinado la influencia de los transductores empleados en nuestro equipo de ultrasonidos sobre la velocidad normal. Los resultados indican que por debajo de 4,5 cm la velocidad aumenta considerablemente. Por encima de este valor la velocidad se mantiene prácticamente constante. Para corregir las mediciones realizadas en distancias inferiores a 4,5 cm se propone la siguiente ecuación:

$$V_N = 25,726 (D_1 - 45) + V_{N1}$$

siendo;

$V_N$  Velocidad normal para distancias superiores a 45 mm en m/s.

$V_{N1}$  Velocidad normal para una distancia  $D_1$  inferior a 45 mm en m/s.

$D_1$  Separación entre transductores (inferior a 45 mm) en milímetros, mm.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

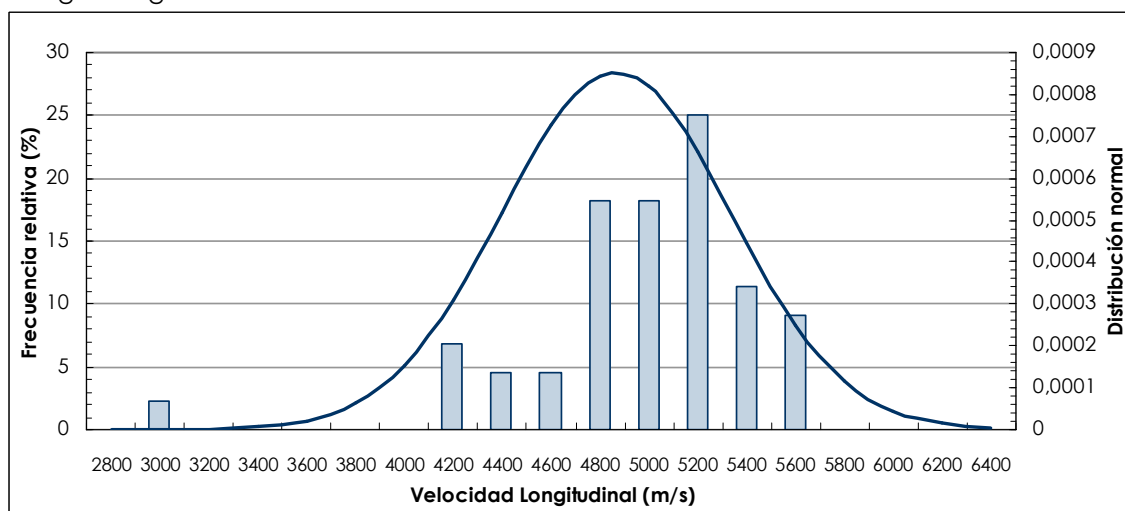
**Tabla VI.19.** Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	V <sub>L</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>L12</sub> (m/s)
1	4914,00	(7,50)	4738,09
2	4672,90	(7,23)	4486,72
3	5443,66	(7,73)	5277,03
4	4863,81	(6,55)	4650,76
5	5263,16	(8,46)	5124,87
6	5624,30	(7,37)	5443,50
7	4930,97	(7,80)	4766,78
8	5646,53	(6,94)	5448,62
9	5230,13	(6,91)	5031,25
10	5274,26	(7,68)	5105,68
11	5500,55	(7,91)	5340,76
12	5184,03	(7,83)	5021,31
13	5167,96	(6,81)	4965,17
14	5107,25	(6,90)	4907,88
15	5238,34	(7,72)	5071,22
16	5698,01	(7,51)	5522,58
17	5125,58	(9,06)	5010,74
18	5109,86	(8,61)	4977,43
19	5205,62	(6,85)	5004,30
20	4664,18	(6,63)	4454,55
21	5194,81	(6,40)	4975,89
22	--	--	--
23	5073,57	(8,22)	4925,99
24	5428,88	(6,40)	5209,97
25	5241,09	(7,30)	5057,36
26	4222,97	(7,82)	4059,79
27	5017,56	(7,13)	4827,48
28	5356,19	(7,37)	5175,39
29	5032,71	(7,03)	4838,72
30	4962,78	(7,36)	4781,49
31	4764,17	(7,98)	4607,31
32	4589,26	(6,93)	4391,36
33	5509,64	(7,11)	5318,58
34	4789,27	(7,68)	4620,69
35	5720,82	(7,21)	5533,67
36	5112,47	(6,70)	4905,29
37	4389,82	(6,83)	4188,00
38	4921,26	(7,23)	4735,08
39	5353,32	(7,13)	5163,23
40	5271,48	(6,96)	5074,56
41	5422,99	(7,27)	5238,28
42	4347,83	(6,56)	4135,26
43	4526,94	(7,12)	4336,36
44	3057,17	(7,50)	2881,25
45	4980,08	(6,76)	4775,34

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>L</sub> media (m/s)	V <sub>L</sub> característ. (m/s)
	Valor más bajo		
44	5533,67 (prob. 35)	4866,03	4143,17
	2881,25 (prob. 44)		

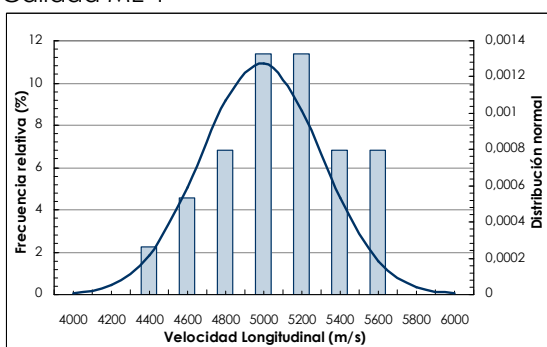
Histograma global



**Figura VI.29.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 4866,03      Desviación típica: 467,23

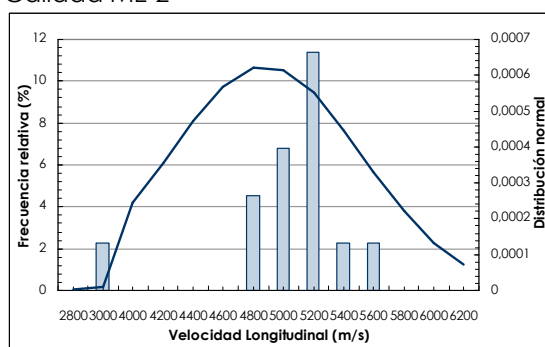
Calidad ME-1



**Figura VI.30.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 4986,10      Desviación típica: 311,92

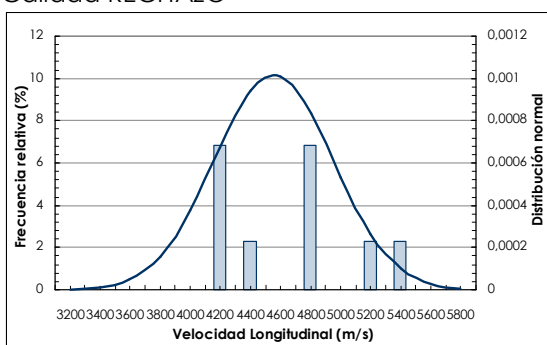
Calidad ME-2



**Figura VI.31.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 4878,14      Desviación típica: 638,70

Calidad RECHAZO



**Figura VI.32.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 4555,03      Desviación típica: 391,60

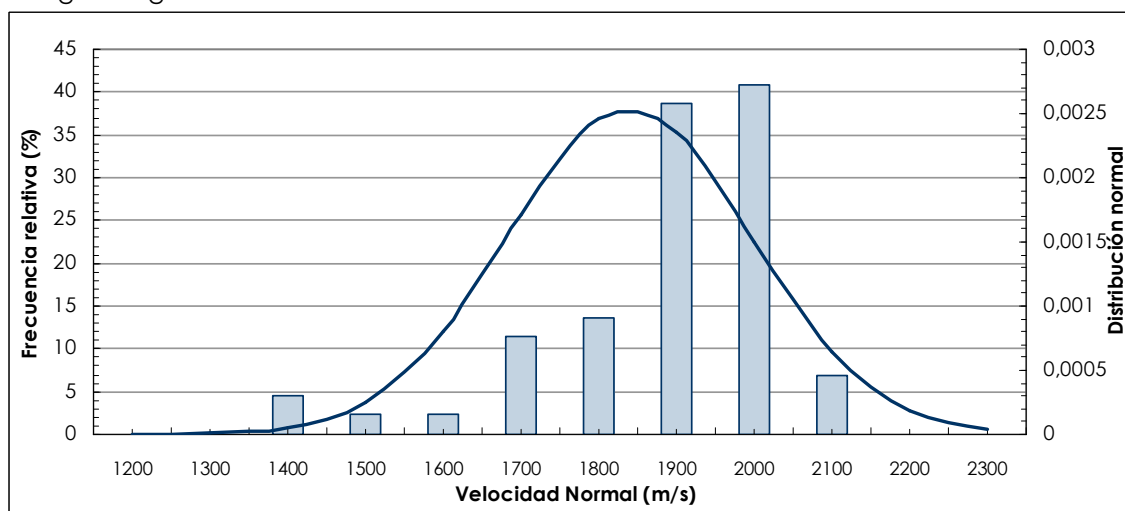
**Tabla VI.20.** Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	V <sub>N</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>N12</sub> (m/s)
1	1908,62	(7,50)	1784,74
2	1729,13	(7,23)	1598,07
3	1864,41	(7,73)	1747,11
4	1846,70	(6,55)	1696,72
5	1963,80	(8,46)	1866,72
6	1449,08	(7,37)	1321,80
7	1981,40	(7,80)	1865,81
8	2017,64	(6,94)	1878,32
9	2010,31	(6,91)	1870,30
10	2040,43	(7,68)	1921,75
11	1597,98	(7,91)	1485,49
12	2143,83	(7,83)	2029,28
13	2142,47	(6,81)	1999,71
14	1966,61	(6,90)	1826,26
15	1968,41	(7,72)	1850,76
16	2150,20	(7,51)	2026,70
17	1964,76	(9,06)	1883,92
18	2184,34	(8,61)	2047,11
19	1840,75	(6,85)	1699,03
20	1853,32	(6,63)	1705,74
21	2111,53	(6,40)	1957,42
22	--	--	--
23	1791,57	(8,22)	1687,68
24	2056,74	(6,40)	1902,63
25	2090,78	(7,30)	1961,63
26	2083,89	(7,82)	1968,99
27	1960,83	(7,13)	1827,02
28	2018,18	(7,37)	1890,90
29	2043,01	(7,03)	1906,44
30	2016,93	(7,36)	1889,31
31	2109,33	(7,98)	1998,91
32	2111,71	(6,93)	1972,39
33	1756,25	(7,11)	1621,75
34	2106,82	(7,68)	1988,14
35	1849,86	(7,21)	1718,11
36	2105,70	(6,70)	1959,84
37	1869,82	(6,83)	1727,75
38	2015,26	(7,23)	1884,20
39	1764,95	(7,13)	1631,13
40	2044,49	(6,96)	1905,86
41	1978,22	(7,27)	1848,18
42	2046,71	(6,56)	1897,07
43	2045,44	(7,12)	1911,28
44	1958,17	(7,50)	1834,33
45	1482,81	(6,76)	1338,67

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>N</sub> media (m/s)	V <sub>N</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
44	2047,11 (prob. 18)	1825,79	1502,37
	1321,80 (prob. 6)		

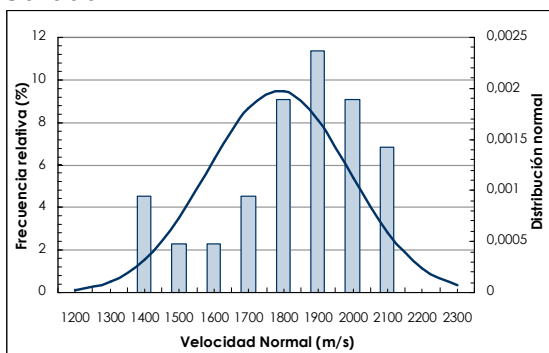
Histograma global



**Figura VI.33.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1838,96      Desviación típica: 157,30

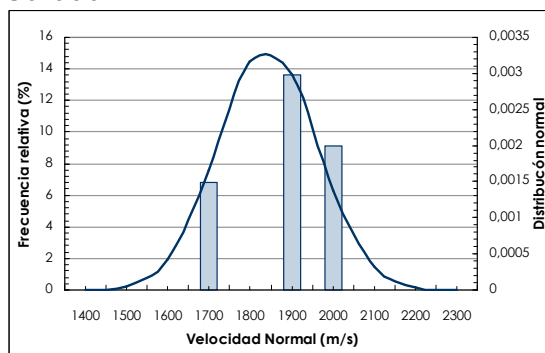
Calidad ME-1



**Figura VI.34.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1784,89      Desviación típica: 201,54

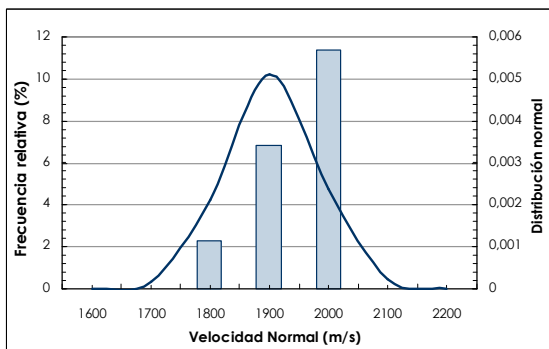
Calidad ME-2



**Figura VI.35.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1841,29      Desviación típica: 118,60

Calidad RECHAZO



**Figura VI.36.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1903,37      Desviación típica: 78,16

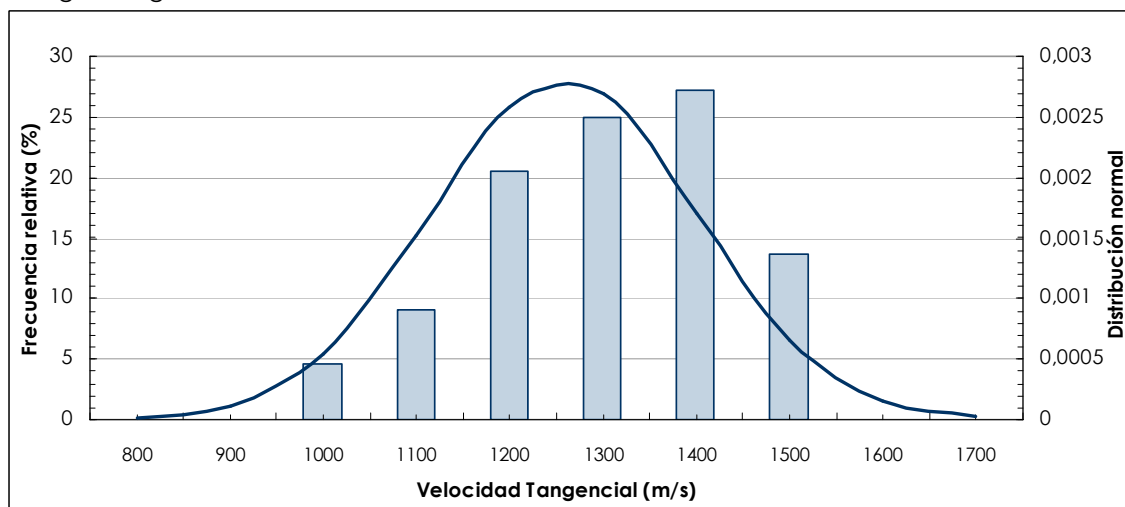
**Tabla VI.21.** Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera nueva:  
especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	V <sub>T</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>T12</sub> (m/s)
1	1568,42	(7,50)	1444,58
2	1476,30	(7,23)	1345,24
3	1408,59	(7,73)	1291,28
4	1327,38	(6,55)	1177,40
5	1291,97	(8,46)	1194,62
6	1063,75	(7,37)	936,47
7	1396,14	(7,80)	1280,55
8	1424,83	(6,94)	1285,51
9	1435,08	(6,91)	1295,07
10	1423,81	(7,68)	1305,13
11	1227,68	(7,91)	1115,19
12	1466,05	(7,83)	1351,50
13	1622,14	(6,81)	1479,38
14	1531,53	(6,90)	1391,18
15	1486,84	(7,72)	1369,19
16	1459,29	(7,51)	1335,80
17	1257,80	(9,06)	1176,96
18	1487,56	(8,61)	1394,34
19	1496,85	(6,85)	1355,12
20	1575,38	(6,63)	1427,81
21	1609,91	(6,40)	1455,80
22	--	--	--
23	1196,58	(8,22)	1092,69
24	1634,96	(6,40)	1480,85
25	1278,44	(7,30)	1149,10
26	1395,50	(7,82)	1280,60
27	1374,41	(7,13)	1240,60
28	1131,11	(7,37)	1003,83
29	1427,05	(7,03)	1290,49
30	1111,58	(7,36)	983,96
31	1221,03	(7,98)	1110,61
32	1442,73	(6,93)	1303,41
33	1169,59	(7,11)	1035,08
34	1439,18	(7,68)	1320,50
35	1524,05	(7,21)	1392,29
36	1267,03	(6,70)	1121,17
37	1431,92	(6,83)	1289,85
38	1393,49	(7,23)	1262,42
39	1362,64	(7,13)	1228,82
40	1277,64	(6,96)	1139,01
41	1287,40	(7,27)	1157,37
42	1459,23	(6,56)	1309,59
43	1619,68	(7,12)	1485,52
44	1369,78	(7,50)	1245,94
45	1150,33	(6,76)	1006,19

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>T</sub> media (m/s)	V <sub>T</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
44	1485,52(prob.43)	1257,68	1004,18
	936,47(prob. 6)		

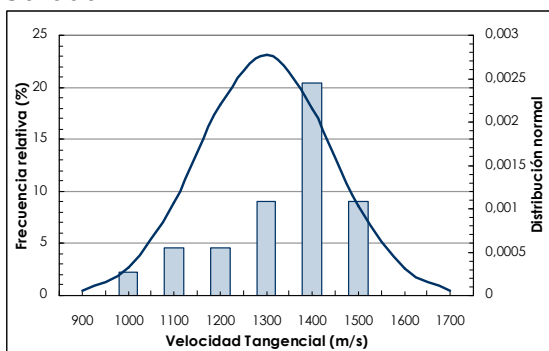
Histograma global



**Figura VI.37.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales en las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1257,68      Desviación típica: 142,06

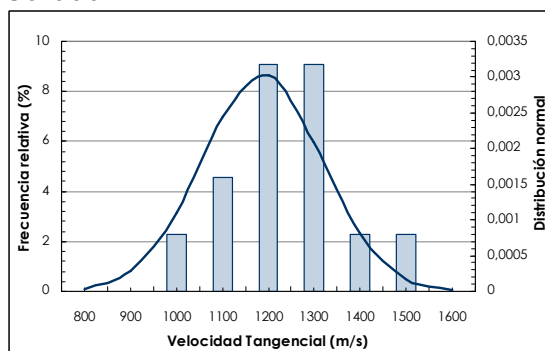
Calidad ME-1



**Figura VI.38.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1297,98      Desviación típica: 143,47

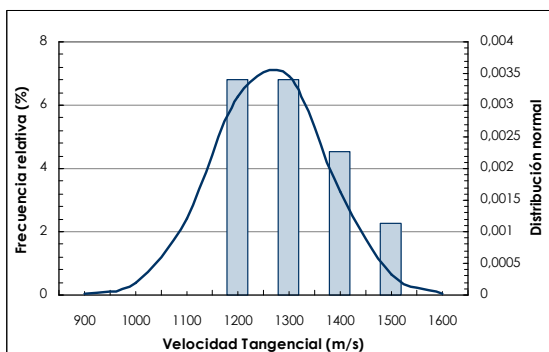
Calidad ME-2



**Figura VI.39.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1186,68      Desviación típica: 131,58

Calidad RECHAZO



**Figura VI.40.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera nueva de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1261,71      Desviación típica: 108,40

**Tabla VI.22.** Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ ,  $V_L/V_T$ ,  $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
1	2,65	3,28	1,24
2	2,80	3,33	1,19
3	3,02	4,08	1,35
4	2,74	3,95	1,44
5	2,74	4,29	1,6
6	4,11	5,81	1,41
7	2,55	3,72	1,46
8	2,90	4,23	1,46
9	2,69	3,88	1,44
10	2,65	3,91	1,47
11	3,59	4,78	1,33
12	2,47	3,71	1,50
13	2,48	3,35	1,35
14	2,68	3,52	1,31
15	2,74	3,70	1,35
16	2,72	4,13	1,52
17	2,66	4,25	1,6
18	2,43	3,57	1,47
19	2,94	3,69	1,25
20	2,61	3,12	1,19
21	2,54	3,41	1,34
22	--	--	--
23	2,91	4,50	1,54
24	2,73	3,51	1,28
25	2,57	4,40	1,71
26	2,06	3,17	1,54
27	2,64	3,89	1,47
28	2,73	5,15	1,88
29	2,53	3,75	1,48
30	2,53	4,85	1,92
31	2,30	4,14	1,80
32	2,22	3,36	1,51
33	3,28	5,13	1,57
34	2,32	3,49	1,51
35	3,22	3,97	1,23
36	2,50	4,37	1,75
37	2,42	3,24	1,34
38	2,51	3,75	1,49
39	3,16	4,02	1,33
40	2,66	4,45	1,67
41	2,83	4,52	1,60
42	2,18	3,15	1,45
43	2,26	2,91	1,29
44	1,57	2,31	1,47
45	3,56	4,74	1,33

Los valores estadísticos para las relaciones entre velocidades:

	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
Valor más bajo	1,57	2,31	1,19
Valor más alto	4,11	5,81	1,92
Valor medio	<b>2,69</b>	<b>3,92</b>	<b>1,46</b>
Desviación típica	0,42	0,66	0,17



**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.23.** Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

PROBETA N°	V <sub>L</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>L12</sub> (m/s)
1	5767,01	(8,51)	5653,01
2	5633,80	(8,30)	5512,85
3	5506,61	(10,19)	5447,36
4	4789,27	(10,48)	4739,42
5	5213,76	(6,88)	4046,23
6	5452,56	(8,53)	5338,96
7	5540,17	(9,49)	5458,03
8	5417,12	(8,50)	5302,70
9	5178,66	(8,23)	5055,26
10	5414,19	(9,08)	5318,57
11	5232,86	(8,89)	5131,11
12	5614,82	(9,51)	5533,51
13	5173,31	(10,16)	5113,24
14	5662,51	(8,99)	5564,04
15	4528,99	(9,86)	4459,11
16	4649,00	(8,60)	4537,85
17	5408,33	(10,11)	5346,63
18	5060,73	(8,05)	4931,60
19	5364,81	(8,54)	5251,62
20	4418,91	(10,83)	4380,50
21	4293,69	(10,45)	4243,02
22	4775,55	(9,40)	4690,56
23	4164,93	(9,85)	4094,65
24	3636,36	(9,31)	3548,51
25	4314,06	(8,89)	4212,32
26	4317,79	(9,01)	4220,13
27	3001,20	(8,74)	2894,55
28	4314,06	(9,73)	4239,69
29	3536,07	(10,71)	3493,98
30	4566,21	(8,43)	4449,34
31	4405,29	(9,10)	4310,49
32	3437,61	(8,73)	3330,55
33	3523,61	(9,01)	3425,95
34	4411,12	(8,86)	4308,55
35	3691,40	(9,16)	3598,64
36	4330,88	(9,20)	4239,35
37	4065,04	(10,33)	4010,28
38	4572,47	(9,44)	4488,71
39	3793,63	(9,36)	3707,41
40	3696,86	(8,76)	3591,02
41	4928,54	(8,58)	4816,57
42	4564,13	(10,36)	4510,60
43	4430,66	(8,99)	4332,18
44	4633,92	(10,50)	4584,89
45	4470,27	(8,53)	4356,67
46	5104,65	(10,24)	5047,03
47	4302,93	(8,70)	4195,05
48	4405,29	(8,73)	4298,23
49	4464,29	(9,44)	4380,52
50	5376,34	(8,95)	5276,64
51	5555,56	(10,30)	5499,98
52	5227,39	(10,24)	5169,78

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>L</sub> media (m/s)	V <sub>L</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
52	5653,01 (prob. 1)	4570,91	3463,36
	2894,55 (prob. 27)		

**Tabla VI.24.** Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

PROBETA N°	V <sub>N</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>N12</sub> (m/s)
1	2089,98	(8,51)	2034,56
2	1957,44	(8,30)	1898,64
3	1990,10	(10,19)	1961,30
4	2052,63	(10,48)	2028,40
5	2040,40	(6,88)	1958,96
6	2042,92	(8,53)	1987,71
7	2050,46	(9,49)	2010,53
8	2101,10	(8,50)	2045,48
9	2051,13	(8,23)	1991,14
10	2110,31	(9,08)	2063,83
11	2049,66	(8,89)	2000,20
12	1730,04	(9,51)	1690,52
13	1710,67	(10,16)	1681,47
14	2071,11	(8,99)	2023,24
15	2092,70	(9,86)	2058,74
16	2202,81	(8,60)	2148,79
17	2168,23	(10,11)	2138,24
18	2127,94	(8,05)	2065,17
19	1983,71	(8,54)	1928,69
20	1976,04	(10,83)	1957,37
21	2006,42	(10,45)	1981,80
22	2150,63	(9,40)	2109,31
23	1954,85	(9,85)	1920,68
24	1796,98	(9,31)	1754,28
25	2121,95	(8,89)	2072,50
26	2134,53	(9,01)	2087,06
27	2122,19	(8,74)	2070,35
28	2058,37	(9,73)	2022,22
29	2015,72	(10,71)	1995,27
30	2030,53	(8,43)	1973,72
31	2133,64	(9,10)	2087,56
32	2048,17	(8,73)	1996,13
33	2093,80	(9,01)	2046,33
34	2142,12	(8,86)	2092,27
35	1963,22	(9,16)	1918,13
36	1972,74	(9,20)	1928,25
37	2145,67	(10,33)	2119,05
38	1228,34	(9,44)	1787,62
39	1710,19	(9,36)	1668,28
40	2057,29	(8,76)	2005,85
41	2228,37	(8,58)	2173,95
42	2153,26	(10,36)	2127,24
43	1773,06	(8,99)	1725,19
44	1952,67	(10,50)	1928,84
45	1816,67	(8,53)	1761,46
46	2073,29	(10,24)	2045,28
47	1846,04	(8,70)	1793,60
48	1822,95	(8,73)	1770,91
49	1993,17	(9,44)	1952,45
50	2091,38	(8,95)	2042,92
51	1963,61	(10,30)	1936,60
52	2052,63	(10,24)	2024,63

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>N</sub> media (m/s)	V <sub>N</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
52	2173,95 (prob. 41)	1972,93	1709,58
	1668,28 (prob. 39)		

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

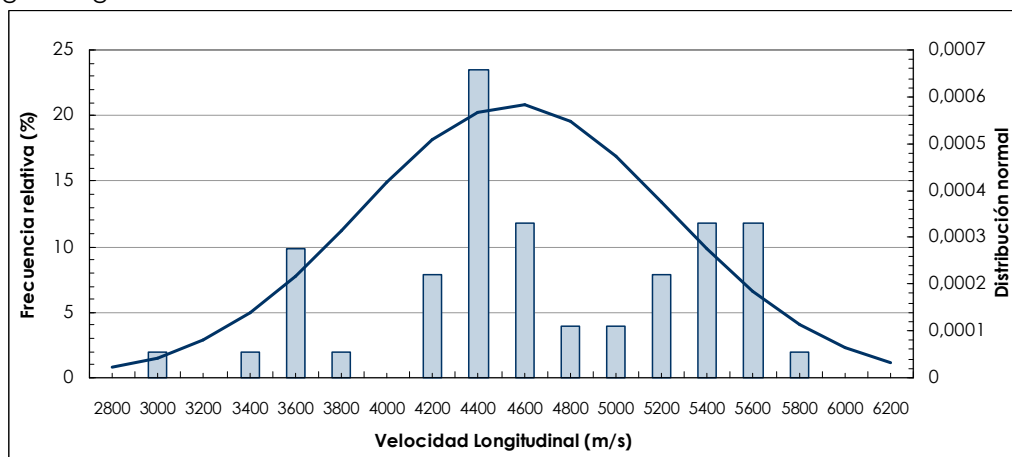
**Tabla VI.25.** Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

PROBETA Nº	V <sub>T</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>T12</sub> (m/s)
1	1713,55	(8,51)	1658,13
2	1623,98	(8,30)	1565,19
3	1568,65	(10,19)	1539,85
4	1538,47	(10,48)	1514,24
5	1558,28	(6,88)	1476,85
6	1555,97	(8,53)	1500,75
7	1342,43	(9,49)	1302,51
8	1180,41	(8,50)	1124,80
9	1483,84	(8,23)	1423,86
10	1727,24	(9,08)	1680,77
11	1671,32	(8,89)	1621,86
12	1158,90	(9,51)	1119,38
13	1295,74	(10,16)	1266,54
14	1068,60	(8,99)	1020,73
15	1670,11	(9,86)	1636,15
16	1876,34	(8,60)	1822,31
17	1722,66	(10,11)	1692,67
18	1784,45	(8,05)	1721,69
19	1749,81	(8,54)	1694,79
20	1666,64	(10,83)	1647,97
21	1617,88	(10,45)	1593,25
22	1710,13	(9,40)	1668,81
23	1595,79	(9,85)	1561,63
24	1729,56	(9,31)	1686,86
25	1784,78	(8,89)	1735,32
26	1870,43	(9,01)	1822,96
27	1792,51	(8,74)	1740,67
28	1643,34	(9,73)	1607,19
29	1560,69	(10,71)	1540,24
30	1744,07	(8,43)	1687,26
31	1611,86	(9,10)	1565,78
32	1641,96	(8,73)	1589,92
33	1603,82	(9,01)	1556,35
34	1756,66	(8,86)	1706,81
35	1738,69	(9,16)	1693,60
36	1590,95	(9,20)	1546,46
37	1666,67	(10,33)	1640,05
38	1377,01	(9,44)	1336,29
39	1362,84	(9,36)	1220,93
40	1368,11	(8,76)	1316,67
41	1402,58	(8,58)	1348,15
42	1367,34	(10,36)	1341,32
43	1635,77	(8,99)	1587,90
44	1580,58	(10,50)	1556,74
45	1645,36	(8,53)	1590,15
46	1677,55	(10,24)	1649,54
47	1625,03	(8,70)	1572,59
48	1549,64	(8,73)	1497,60
49	1637,49	(9,44)	1596,78
50	1772,67	(8,95)	1724,21
51	1545,28	(10,30)	1618,26
52	1719,64	(10,24)	1691,63

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Valor más alto	V <sub>T</sub> media (m/s)	V <sub>T</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
52	1822,96 (prob. 16)	1552,44	1177,67
	1020,73 (prob. 14)		

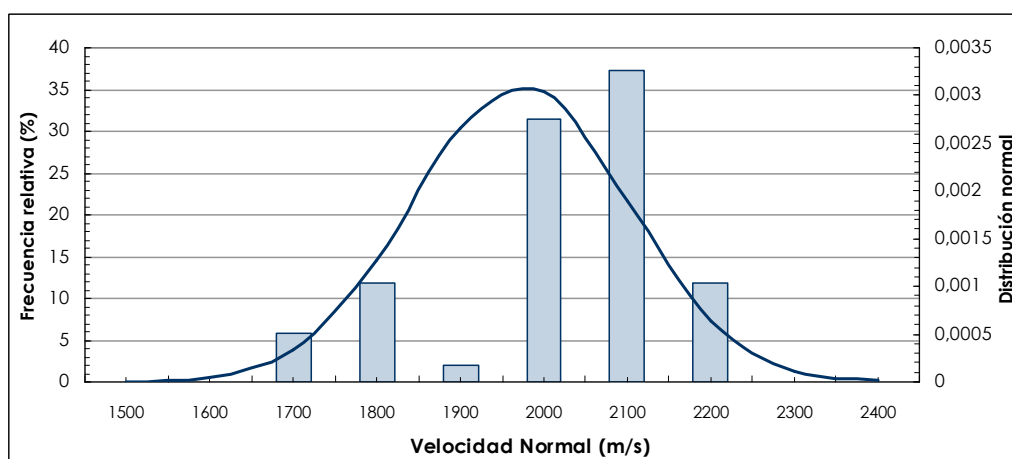
# Histograma global



**Figura VI.41.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales en las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Promedio: 4559,16

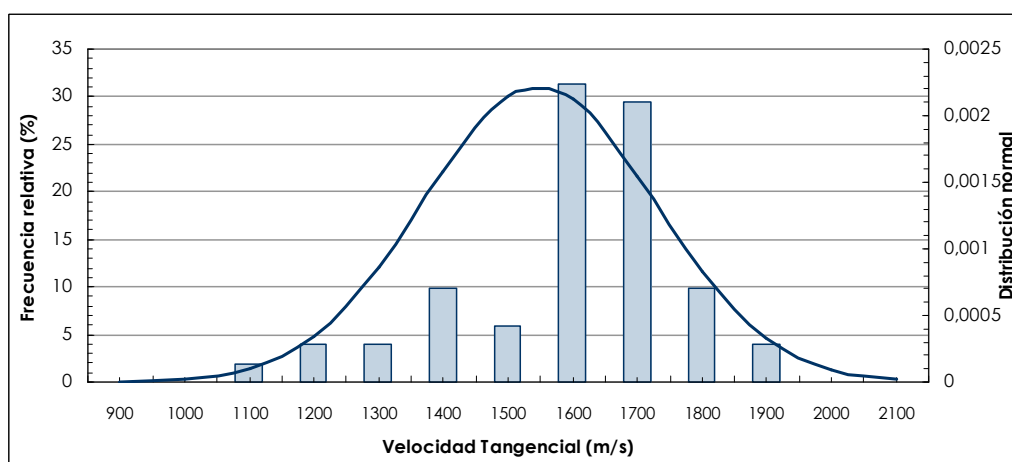
Desviación típica: 684,25



**Figura VI.42.** Histograma de frecuencias de velocidades normales en las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Promedio: 1971,92

Desviación típica: 128,22



**Figura VI.43.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales en las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Promedio: 1547,67

Desviación típica: 179,58

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.26.** Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ ,  $V_L/V_T$ ,  $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

PROBETA N°	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
1	2,77	3,40	1,23
2	2,90	3,52	1,21
3	2,77	3,53	1,21
4	2,33	3,13	1,34
5	2,57	3,41	1,33
6	2,68	3,55	1,32
7	2,71	4,19	1,54
8	2,59	4,71	1,82
9	2,53	3,55	1,40
10	2,57	3,16	1,23
11	2,56	3,16	1,23
12	3,27	4,94	1,51
13	3,04	4,03	1,33
14	2,75	5,45	1,98
15	2,16	2,72	1,26
16	2,11	2,49	1,18
17	2,50	3,15	1,26
18	2,38	2,864	1,20
19	2,72	3,09	1,14
20	2,23	2,65	1,19
21	2,14	2,66	1,24
22	2,22	2,81	1,16
23	2,13	2,62	1,23
24	2,02	2,10	1,04
25	2,03	2,42	1,19
26	2,02	2,31	1,14
27	1,39	1,66	1,19
28	2,09	2,63	1,26
29	1,75	2,26	1,30
30	2,25	2,63	1,17
31	2,06	2,75	1,33
32	1,66	2,09	1,26
33	1,67	2,20	1,31
34	2,05	2,52	1,23
35	1,87	2,12	1,13
36	2,19	2,74	1,25
37	1,89	2,44	1,29
38	2,51	3,35	1,34
39	2,22	2,80	1,26
40	1,79	2,72	1,52
41	2,21	3,57	1,61
42	2,12	3,36	1,59
43	2,51	2,72	1,09
44	2,37	2,94	1,24
45	2,47	2,74	1,11
46	1,46	3,06	1,24
47	2,33	2,66	1,14
48	2,42	2,87	1,18
49	2,24	2,74	1,22
50	2,58	3,06	1,18
51	2,84	3,39	1,20
52	2,55	3,05	1,20

Los valores estadísticos para las relaciones entre velocidades:

	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
Valor más bajo	1,40	2,10	1,04
Valor más alto	3,27	5,45	1,98
Valor medio	<b>2,34</b>	<b>3,02</b>	<b>1,29</b>
Desviación típica	0,37	0,71	0,17

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

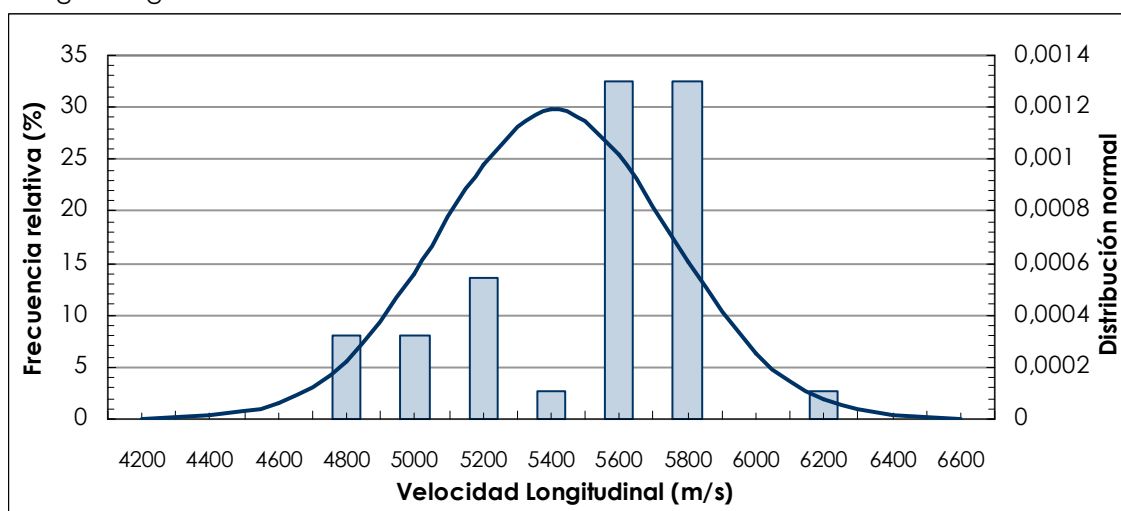
**Tabla VI.27.** Velocidades de transmisión longitudinales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	V <sub>L</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>L12</sub> (m/s)
1	5959,48	(7,38)	5779,16
2	5931,20	(7,61)	5759,68
3	5783,69	(9,43)	5683,51
4	5221,93	(11,03)	5184,30
5	5130,84	(10,58)	5075,61
6	5005,01	(10,46)	4944,89
7	5081,30	(10,02)	5004,09
8	5396,65	(10,68)	5345,34
9	5491,49	(11,06)	5454,83
10	5662,51	(8,83)	5538,88
11	5672,15	(10,07)	5596,89
12	5627,46	(9,25)	5519,95
13	5760,37	(9,25)	5652,86
14	5624,30	(10,27)	5556,86
15	5652,91	(9,57)	5558,11
16	5701,25	(11,56)	5684,14
17	5621,14	(8,21)	5473,07
18	5025,13	(9,40)	4923,48
19	4743,83	(10,57)	4688,12
20	4789,27	(10,01)	4711,57
21	5170,63	(8,95)	5051,40
22	5053,06	(10,47)	4993,43
23	4901,96	(9,13)	4790,06
24	5271,48	(9,17)	5161,04
25	5470,46	(11,11)	5435,76
26	5767,01	(9,08)	5653,15
27	5730,66	(10,47)	5671,04
28	5509,64	(9,65)	5417,77
29	5735,74	(10,17)	5682,39
30	5694,76	(9,12)	5582,37
31	5720,82	(8,91)	5600,12
32	5506,61	(11,7)	5494,87
33	6153,85	(8,76)	6027,28
34	5760,37	(11,47)	5739,84
35	5583,47	(8,71)	5454,95
36	5777,01	(10,48)	5717,87
37	5730,66	(9,10)	5617,29

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>L</sub> media (m/s)	V <sub>L</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
37	6027,28 (prob. 33)	5411,513	4774,36
	4688,12 (prob. 19)		

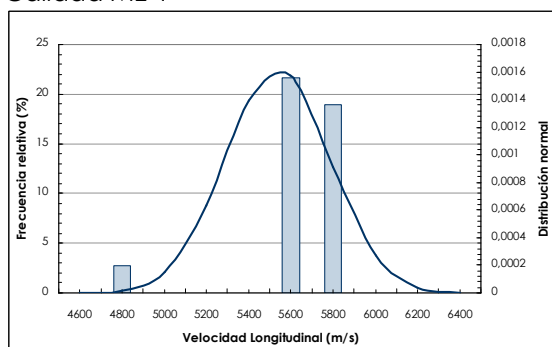
Histograma global



**Figura VI.44.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 5411,51      Desviación típica: 334,47

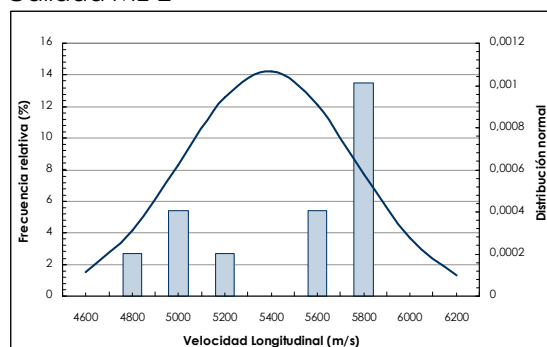
Calidad ME-1



**Figura VI.45.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 5536,17      Desviación típica: 244,89

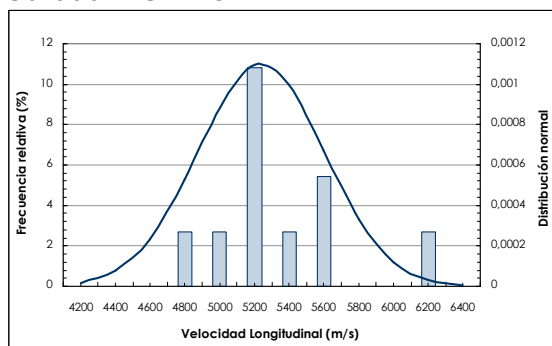
Calidad ME-2



**Figura VI.46.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 5387,10      Desviación típica: 373,36

Calidad RECHAZO



**Figura VI.47.** Histograma de frecuencias de velocidades longitudinales de las probetas de madera vieja de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 5238,89      Desviación típica: 362,18

**Tabla VI.28.** Velocidades de transmisión normales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

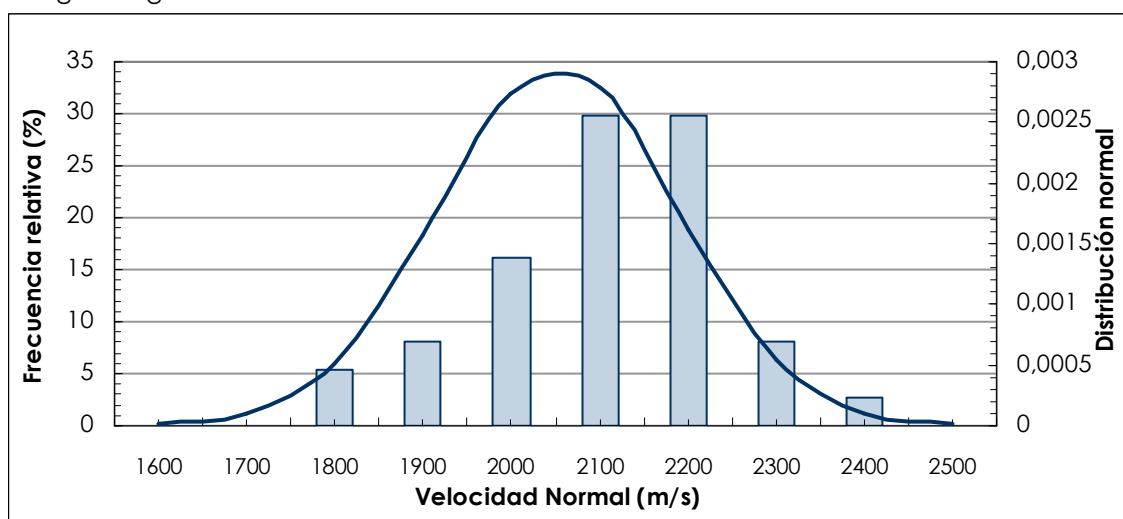
PROBETA N°	V <sub>N</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>N12</sub> (m/s)
1	1953,87	(7,38)	1826,93
2	1898,15	(7,61)	1777,40
3	1782,65	(9,43)	1712,12
4	2137,33	(11,03)	2110,84
5	1955,83	(10,58)	1916,95
6	2146,47	(10,46)	2104,16
7	2289,03	(10,02)	2234,67
8	2255,54	(10,68)	2219,42
9	2156,60	(11,06)	2130,80
10	1953,95	(8,83)	1866,91
11	2111,55	(10,07)	2058,57
12	2090,62	(9,25)	2014,94
13	2133,06	(9,25)	2057,37
14	2036,67	(10,27)	1989,19
15	1906,45	(9,57)	1839,71
16	2103,16	(11,56)	2091,11
17	2081,38	(8,21)	1977,15
18	2056,60	(9,40)	1985,05
19	2157,18	(10,57)	2117,96
20	2179,98	(10,01)	2125,28
21	2457,73	(8,95)	2373,79
22	2051,36	(10,47)	2009,39
23	2066,32	(9,13)	2087,54
24	2207,16	(9,17)	2129,41
25	2164,18	(11,11)	2139,75
26	2042,72	(9,08)	1962,56
27	2156,89	(10,47)	2114,92
28	2055,33	(9,65)	1990,65
29	2114,70	(10,17)	2064,47
30	2151,96	(9,12)	2072,83
31	2227,18	(8,91)	2142,21
32	2028,88	(11,7)	2020,62
33	2100,84	(8,76)	2011,74
34	2284,82	(11,47)	2270,37
35	2180,71	(8,71)	2090,23
36	2185,00	(10,48)	2143,37
37	2233,41	(9,10)	2153,60

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>N</sub> media (m/s)	V <sub>N</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
37	2373,79 (prob. 21)	2052,270	1817,02
	1712,12 (prob. 3)		



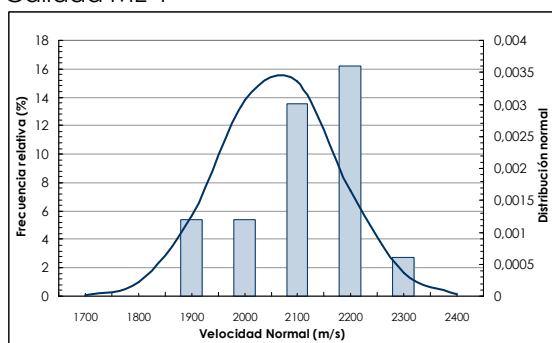
Histograma global



**Figura VI.48.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 2052,26      Desviación típica: 134,87

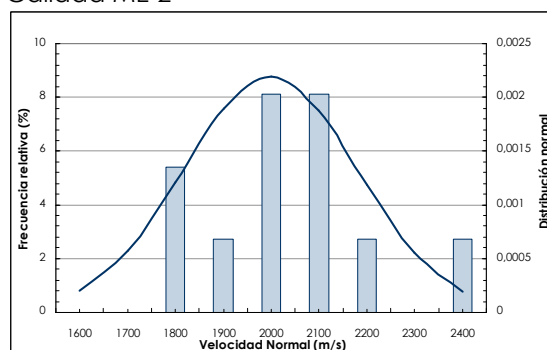
Calidad ME-1



**Figura VI.49.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 2061,41      Desviación típica: 111,76

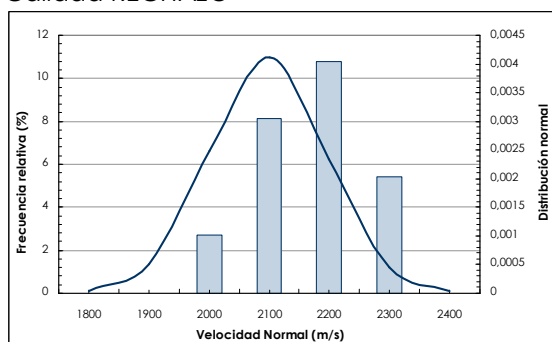
Calidad ME-2



**Figura VI.50.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1998,18      Desviación típica: 181,56

Calidad RECHAZO



**Figura VI.51.** Histograma de frecuencias de velocidades normales de las probetas de madera vieja de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 2097,14      Desviación típica: 96,70

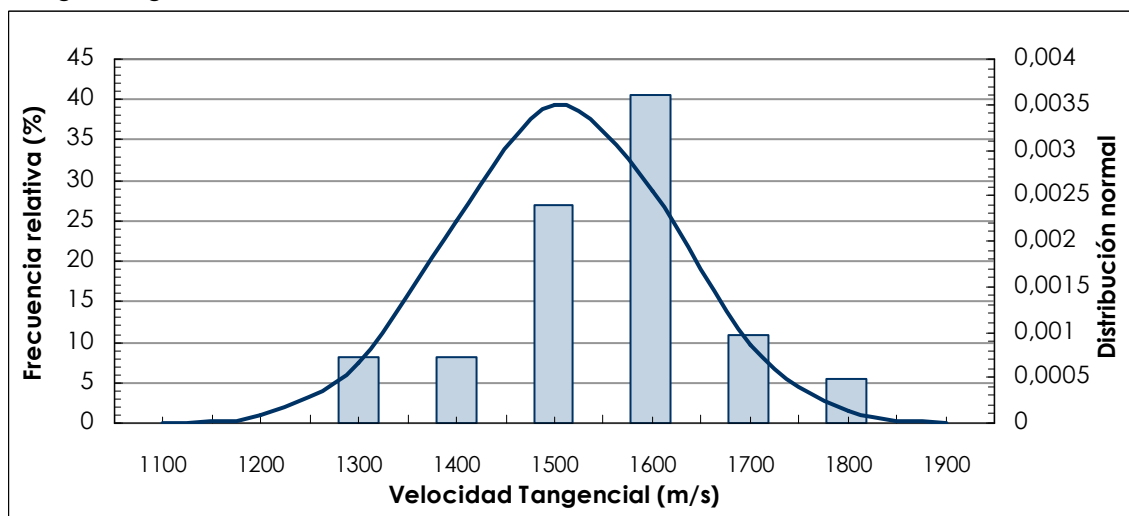
**Tabla VI.29.** Velocidades de transmisión tangenciales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	V <sub>T</sub> (m/s) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		V <sub>T12</sub> (m/s)
1	1638,91	(7,38)	1511,97
2	1669,81	(7,61)	1549,06
3	1372,55	(9,43)	1302,02
4	1308,70	(11,03)	1282,21
5	1318,68	(10,58)	1279,80
6	1516,13	(10,46)	1473,81
7	1566,44	(10,02)	1512,08
8	1505,77	(10,68)	1469,65
9	1513,35	(11,06)	1487,55
10	1671,12	(8,83)	1584,08
11	1767,60	(10,07)	1714,62
12	1727,50	(9,25)	1651,81
13	1772,43	(9,25)	1696,75
14	1655,92	(10,27)	1608,44
15	1653,52	(9,57)	1586,78
16	1606,65	(11,56)	1594,60
17	1860,54	(8,21)	1756,31
18	1355,84	(9,40)	1284,28
19	1506,16	(10,57)	1466,94
20	1528,77	(10,01)	1474,07
21	1529,05	(8,95)	1445,11
22	1470,59	(10,47)	1428,62
23	1533,74	(9,13)	1554,96
24	1563,96	(9,17)	1486,21
25	1491,00	(11,11)	1466,57
26	1521,25	(9,08)	1441,10
27	1593,17	(10,47)	1551,20
28	1452,78	(9,65)	1388,11
29	1443,04	(10,17)	1392,81
30	1584,90	(9,12)	1505,77
31	1639,98	(8,91)	1555,01
32	1544,69	(11,7)	1536,43
33	1633,99	(8,76)	1544,89
34	1663,84	(11,47)	1649,39
35	1632,06	(8,71)	1541,58
36	1576,40	(10,48)	1534,77
37	1613,92	(9,10)	1534,11

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

N° de probetas	Valor más alto	V <sub>T</sub> media (m/s)	V <sub>T</sub> caract. (m/s)
	Valor más bajo		
37	1756,31 (prob.17)	1509,283	1283,87
	1279,8 (prob. 5)		

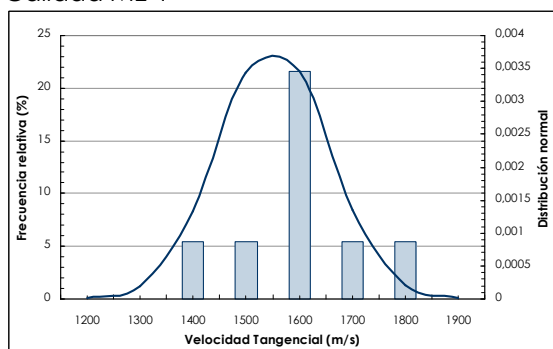
Histograma global



**Figura VI.52.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1509,28      Desviación típica: 114,12

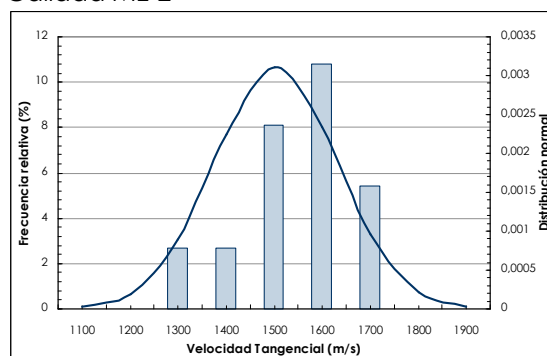
Calidad ME-1



**Figura VI.53.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad ME-1: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1550,43      Desviación típica: 102,89

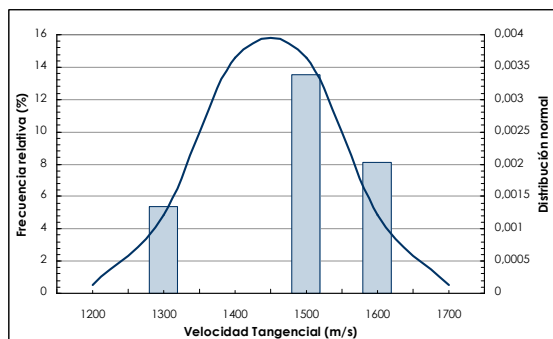
Calidad ME-2



**Figura VI.54.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad ME-2: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1503,35      Desviación típica: 128,51

Calidad RECHAZO



**Figura VI.55.** Histograma de frecuencias de velocidades tangenciales de las probetas de madera vieja de calidad Rechazo: especie *Pinus Sylvestris* L.

Promedio: 1449,95      Desviación típica: 95,57

**Tabla VI.30.** Relación entre velocidades de transmisión ( $V_L/V_N$ ,  $V_L/V_T$ ,  $V_N/V_T$ ) de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
1	3,16	3,82	1,21
2	3,24	3,71	1,15
3	3,32	4,36	1,31
4	2,45	4,04	1,65
5	2,64	3,96	1,50
6	2,35	3,35	1,43
7	2,23	3,31	1,48
8	2,40	3,63	1,51
9	2,56	3,66	1,43
10	2,96	3,49	1,18
11	2,71	3,26	1,20
12	2,74	3,34	1,22
13	2,74	3,33	1,21
14	2,79	3,45	1,24
15	3,02	3,50	1,16
16	2,71	3,56	1,31
17	2,76	3,11	1,13
18	2,48	3,83	1,55
19	2,21	3,19	1,44
20	2,21	3,19	1,44
21	2,12	3,49	1,64
22	2,48	3,49	1,41
23	2,29	3,29	1,43
24	2,42	3,47	1,43
25	2,54	3,70	1,46
26	2,88	3,92	1,36
27	2,68	3,65	1,36
28	2,72	3,90	1,43
29	2,75	4,08	1,48
30	2,69	3,70	1,38
31	2,61	3,60	1,38
32	2,71	3,57	1,32
33	2,99	3,90	1,30
34	2,52	3,48	1,38
35	2,61	3,53	1,36
36	2,66	3,72	1,40
37	2,60	3,66	1,40

Los valores estadísticos para las relaciones entre velocidades:

	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
Valor más bajo	2,12	3,49	1,64
Valor más alto	3,31	4,36	1,13
Valor medio	<b>2,65</b>	<b>3,60</b>	<b>1,36</b>
Desviación típica	0,27	0,27	0,12

## Discusión de resultados y conclusiones:

### Madera nueva:

- Se ha realizado un estudio comparativo de las velocidades de ultrasonidos en dos especies de madera nueva de coníferas (*Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold). Los valores obtenidos reflejan que el rango de velocidades para ambas especies es similar:

	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)		
	LONGITUDINAL, $V_L$	NORMAL, $V_N$	TANGENCIAL, $V_T$
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	4866,03	1838,96	1257,68
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	4559,16	1971,92	1547,67

Deben señalarse las siguientes consideraciones:

- El valor medio de velocidad longitudinal es ligeramente superior para la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). El porcentaje de valores obtenidos por rango de velocidades y el valor del coeficiente de variación obtenido en cada caso es el siguiente:

	% RANGOS DE VELOCIDAD $V_L$ (m/s)		
	< 4000 (m/s)	4000 – 5000 (m/s)	> 5000 (m/s)
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	2,27%	52,27%	45,45%
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	15,38%	48,07%	36,53%

	COEFICIENTE DE VARIACIÓN $V_L$ (%)	
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	9,60%	
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	14,70%	

Un coeficiente de variación mayor en las mediciones de velocidades longitudinales en la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) demuestra que el rango posible de resultados es superior. De hecho, en el lote de madera estudiado se han detectado piezas cuyas velocidades longitudinales alcanzan valores aproximados de 3500 m/s en contraposición a piezas con velocidades por encima de 5000 m/s. En la especie de pino silvestre, se detecta una mayor homogeneidad en los resultados.

- Los valores medios de las velocidades normal y tangencial son ligeramente superiores para la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) con el siguiente coeficiente de variación en cada caso:

	COEFICIENTE DE VARIACIÓN $V_N$ , $V_T$ (%)	
	VEL. NORMAL, $V_N$	VEL. TANGENCIAL, $V_T$
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	8,00%	10,40%
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	6,38%	11,21%

- Las relaciones entre las velocidades son, en todos los casos, superiores para la madera de la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). No obstante, este margen de diferencia es mínimo y no permite establecer conclusiones definitivas.

	RELACIONES ENTRE VELOCIDADES		
	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	2,69	3,92	1,46
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	2,34	3,02	1,29

3. Con todo ello, se concluye que no es posible establecer un criterio fiable, a partir de una medición con ultrasonidos, que permita discriminar ambas especies de coníferas ya que, tanto los valores de velocidad como las relaciones entre las mismas, no ofrecen márgenes suficientes para extraer conclusiones con garantía.
4. Atendiendo a las calidades visuales establecidas en la norma UNE 56544:2007 (ME-1, ME-2 y Rechazo), se obtienen los siguientes valores de velocidades de ultrasonidos medias para cada caso:

	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)		
	CALIDAD ME-1	CALIDAD ME-2	RECHAZO
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylvestris</i> L)</b>	V <sub>L</sub> : 4986,10 V <sub>N</sub> : 1784,89	V <sub>L</sub> : 4878,14 V <sub>N</sub> : 1841,29	V <sub>L</sub> : 4555,03 V <sub>N</sub> : 1903,37
<b>Pino laricio (<i>Pinus Nigra</i> Arnold)</b>	V <sub>L</sub> : 4559,17 V <sub>N</sub> : 1971,92	- -	- -

En el análisis de estos resultados se observa que para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) la velocidad de transmisión longitudinal media, disminuye conforme baja la calidad visual del lote. En cierta medida, este es un resultado de esperar por la influencia (retardo en la señal) que los diferentes defectos tienen sobre la velocidad de propagación de la onda ultrasónica. Por el contrario, las velocidades normales, que ofrecen lecturas puntuales en las piezas, varían aleatoriamente, aumentando en este caso, con lo que no pueden utilizarse como variables predictoras. Para la especie de madera pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) no se pueden obtener resultados concluyentes al contar solo con piezas de una única calidad visual.

En estos resultados coincidimos parcialmente con otros autores (Acuña et al., 2006) que obtienen que, para la madera de pino gallego (*Pinus Pinaster* Ait.), la velocidad longitudinal media de ultrasonidos disminuye al descender la calidad visual o el valor de los parámetros resistentes del MOR (módulo de rotura) o MOE (módulo de elasticidad) de un lote de piezas. No obstante, entre las piezas de calidad ME-2 y rechazo no tiene diferencias significativas siendo el valor de velocidad media ligeramente superior para las piezas rechazadas lo cual resulta incongruente con los resultados obtenidos previamente por los mismos autores.

Madera nueva y vieja:

1. Se ha realizado un estudio comparativo de las velocidades de ultrasonidos en dos lotes de madera (nueva y vieja) de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Los resultados revelan unos valores de velocidad ligeramente superiores para el lote de madera vieja:

	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)		
	LONGITUDINAL, $V_L$	NORMAL, $V_N$	TANGENCIAL, $V_T$
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) N</b>	4866,03	1838,96	1257,68
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) V</b>	5411,51	2052,27	1509,28

2. Las relaciones entre las velocidades se mantienen prácticamente constantes para ambos lotes. Otros autores (Rubio de Hita, 1997) han apuntado unos valores para esta especie de  $V_L/V_N$  2,46,  $V_L/V_T$  3,45 y  $V_N/V_T$  1,37. Estos resultados fueron obtenidos a partir de pequeñas probetas (20x20x300 mm) lo que puede explicar las bajadas en las relaciones de  $V_L/V_N$  y  $V_L/V_T$ . Las medidas de  $V_N$  y  $V_T$  al estar tomados en distancias inferiores a 4,5 cm alcanzan unos valores superiores y provocan una bajada en las relaciones  $V_L/V_N$  y  $V_L/V_T$ .

	RELACIONES ENTRE VELOCIDADES		
	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) N</b>	2,69	3,92	1,46
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) V</b>	2,65	3,60	1,36

3. Los valores de velocidades medias para cada una de las calidades visuales de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) asignadas según la norma de clasificación visual UNE 56544:2007 son:
- 4.

	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)		
	CALIDAD ME-1	CALIDAD ME-2	RECHAZO
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) N</b>	$V_L$ : 4986,10	$V_L$ : 4878,14	$V_L$ : 4555,03
	$V_N$ : 1784,89	$V_N$ : 1841,29	$V_N$ : 1903,37
<b>Pino silvestre (<i>Pinus Sylv. L</i>) V</b>	L: 5536,17	L: 5387,10	L: 5238,89
	N: 2061,41	N: 1998,18	N: 2097,14

Nuevamente se demuestra que para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) la velocidad de transmisión longitudinal media, disminuye conforme baja la calidad visual del lote. Por el contrario, las velocidades normales, que ofrecen lecturas puntuales en las piezas, varían aleatoriamente con lo que no pueden utilizarse como variables predictoras.

Estos resultados confirman que, para madera nueva y vieja en buen estado, debe utilizarse la velocidad longitudinal de ultrasonidos como variable predictora del comportamiento mecánico de la madera.

### VI.2.1.1.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

En una segunda etapa del proceso operatorio se llevan a cabo los ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas de las probetas. Mediante los ensayos definidos en la norma UNE EN 408:2011 se deducen el módulo de elasticidad global en flexión de una pieza ( $E_{m,g}$  o MOE) y su resistencia a flexión ( $f_m$  o MOR). En el Capítulo VI.2. (Plan experimental) se describe detalladamente el procedimiento de estos ensayos.

#### **VI.2.1.1.2.1. Determinación del módulo de elasticidad global ( $E_{m,g}$ o MOE)**

El módulo de elasticidad global,  $E_{m,g}$  o MOE, viene dado por la siguiente expresión:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión en milímetros, mm. En este caso 300 mm.
- l Luz en flexión en milímetros, mm. En este caso 900 mm.
- $F_2 - F_1$  Incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.
- $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en milímetros, mm, correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

Según la norma UNE EN 384:2010, el valor del módulo de elasticidad global obtenido debe ser corregido con respecto a una humedad de referencia:

*“En el caso de muestras ensayadas en condiciones distintas a las de referencia, 12%, pero con un contenido de humedad medio dentro del intervalo comprendido entre el 10% y el 18%, la corrección para el 5º percentil debe ser del 1% por cada variación del 1% del contenido de humedad”.*

A partir del módulo de elasticidad global puede obtenerse el módulo de elasticidad local o “verdadero”. La norma UNE 384:2010 plantea la siguiente expresión:

$$E_{m,l} = 1,3 \cdot E_{m,g} - 2690$$

siendo;

- $E_{m,l}$  Módulo de elasticidad local en N/mm<sup>2</sup>.
- $E_{m,g}$  Módulo de elasticidad global en N/mm<sup>2</sup>.

El valor del módulo de elasticidad local o “verdadero”,  $E_{m,l}$ , es el que se emplea para la asignación de clases resistentes.



#### **VI.2.1.1.2.2. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR)**

La resistencia a flexión ( $f_m$  o MOR) se calcula mediante la expresión:

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$F_{\max}$	Carga de rotura a flexión registrada en el ensayo en newtons, N.
$a$	Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión en milímetros, mm. En este caso 300 mm.
$W$	Módulo resistente en milímetros elevados a la tercera potencia, mm <sup>3</sup> . En este caso 20833,33 mm <sup>3</sup> .

Según la norma UNE 384:2010, "las condiciones de referencia del ensayo de flexión se corresponden con un canto de 150 mm y una luz total igual a 18 veces el canto de la probeta". Para ello "el 5º percentil de la resistencia a flexión se corregirá respecto a un canto de referencia dividiendo por":

$$k_h = \left[ \frac{150}{h} \right]^{0,2}$$

siendo;

$h$  Canto de la probeta de ensayo en milímetros, mm. En nuestro caso 50 mm.

De esta forma, el factor de corrección aplicable a las probetas utilizadas en este estudio (50x50x1000 mm<sup>3</sup>) viene dado por esta expresión y es igual a:

$$k_h = \left[ \frac{150}{50} \right]^{0,2} = 1,245$$

Finalmente, para la asignación de clases resistentes en función de la resistencia a flexión,  $f_m$ , debe aplicarse un factor de corrección  $k_s$ , definido en la norma UNE 384:2010 (Capítulo III, Figura III.61), en función del número y tamaño de las muestras ( $n^\circ$  de probetas). Para el caso que nos ocupa el factor de corrección toma los siguientes valores de:

Madera nueva:

Lote de 1 muestra de 45 probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L): 0,77

Lote de 1 muestra de 52 probetas de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold): 0,79

Madera vieja:

Lote de 1 muestra de 37 probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L): 0,70

A continuación se recogen los resultados del conjunto de las probetas por lote en las Tablas VI.31 (lote de madera nueva de *Pinus Sylvestris* L), VI.32 (lote de madera nueva de *Pinus Nigra* Arnold) y VI.33 (lote de madera vieja de *Pinus Sylvestris* L).

**Tabla VI.31.** Módulos de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12^1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR^2}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	10122,30	10422,17	10858,82	69,192	55,58
2	10184,40	10528,12	10996,55	70,056	56,27
3	11333,25	11725,66	12553,35	80,352	64,54
4	11071,54	11425,83	12163,57	64,44	51,76
5	8756,10	8938,88	8930,54	56,592	45,46
6	11985,30	12316,39	13321,30	79,92	64,19
7	8658,51	8870,65	8841,84	50,544	40,60
8	13475,70	13854,70	15321,11	92,88	74,60
9	13258,35	13584,84	14970,29	88,776	71,31
10	8977,89	9225,90	9303,67	54,432	43,72
11	11457,45	11812,63	12666,41	76,248	61,24
12	9128,70	9394,57	9522,94	58,104	46,67
13	8880,30	9228,85	9307,50	60,552	48,64
14	12016,35	12518,03	13583,43	78,624	63,15
15	10539,26	10942,38	11535,09	60,264	48,40
16	12530,40	12921,98	14108,57	93,744	75,30
17	10060,20	10346,92	10760,99	79,992	64,25
18	9108,00	9430,20	9569,26	66,6	53,49
19	12242,57	12660,35	13768,45	75,6	60,72
20	9642,44	9981,13	10285,46	63	50,60
21	13271,66	13785,93	15231,70	81,432	65,41
22	--	--	--	--	--
23	9908,40	10260,15	10648,19	70,848	56,91
24	12709,80	13200,72	14470,93	67,032	53,84
25	10836,45	11265,84	11955,59	71,64	57,54
26	8587,54	8817,26	8772,43	52,632	42,27
27	9842,85	10160,28	10518,36	67,968	54,59
28	8818,20	9149,98	9204,97	58,248	46,79
29	10432,80	10837,07	11398,19	82,728	66,45
30	9625,50	9910,66	10193,85	66,6	53,49
31	10557,00	10839,40	11401,22	59,256	47,60
32	9190,80	9515,92	9680,69	54,072	43,43
33	9936,00	10241,53	10623,98	63,936	51,35
34	5154,30	5340,50	4252,65	19,008	15,27
35	13520,06	14037,20	15558,36	78,984	63,44
36	7327,80	7586,10	7171,93	37,008	29,73
37	6706,80	6973,40	6375,42	34,704	27,87
38	6671,31	6913,98	6298,17	37,872	30,42
39	10184,40	10502,66	10963,45	47,16	37,88
40	11550,60	11915,89	12800,65	73,944	59,39
41	6520,50	6734,05	6064,26	35,136	28,22
42	4471,20	4650,61	3355,79	13,824	11,10
43	9829,54	10199,38	10569,19	60,696	48,75
44	6955,20	7789,82	7436,76	50,832	40,83
45	9936,00	10304,87	10706,33	68,256	54,82

<sup>1</sup> Corrección en función del contenido de humedad. Humedad de referencia 12% (UNE EN 384:2010)

<sup>2</sup> Corrección de la resistencia a flexión según dimensiones de las probetas. Dimensiones de referencia 150 mm de canto y longitud 18h (UNE EN 384:2010)

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

▪ Valores estadísticos globales:

Los valores estadísticos para el lote completo son los siguientes:

	<b>E<sub>m,g</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,g12</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,l</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m,HR</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>
Valor más bajo	4471,2	4830,01	3355,79	13,82	11,10
Valor más alto	13520,05	14037,19	15558,36	93,74	75,29
Valor medio	9908,49	10304,52	<b>10636,87</b>	63,03	<b>50,63</b>
5º percentil	6543,12	6978,95	<b>6099,35</b>	34,76	<b>27,92</b>
Desviación típica	2117,62	2130,97	2820,67	17,55	14,09
Clase resistente			<b>C18</b>		<b>C20*</b>

▪ Valores estadísticos según calidades visuales (UNE 56544):

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 **(50,00% del lote)** son:

	<b>E<sub>m,g</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,g12</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,l</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m,HR</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>
Valor más bajo	8658,51	8870,64	8841,84	50,54	40,59
Valor más alto	13520,05	14037,19	15558,36	93,74	75,29
Valor medio	10765,71	11129,12	<b>11777,86</b>	71,52	<b>57,44</b>
5º percentil	8891,68	9237,13	<b>9318,27</b>	54,27	<b>43,59</b>
Desviación típica	1491,66	1543,87	2007,03	11,10	8,92
Clase resistente			<b>C35</b>		<b>C30</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 **(29,54% del lote)** son:

	<b>E<sub>m,g</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,g12</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,l</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m,HR</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>
Valor más bajo	6955,2	7586,10	7171,93	37,01	29,72
Valor más alto	13475,7	13854,70	15321,11	92,88	74,60
Valor medio	9929,17	10295,24	<b>10693,81</b>	62,55	<b>50,24</b>
5º percentil	7178,76	7708,33	<b>7330,83</b>	43,09	<b>34,62</b>
Desviación típica	1940,14	1940,75	2522,98	14,59	11,72
Clase resistente			<b>C24</b>		<b>C27</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo **(20,45% del lote)** son:

	<b>E<sub>m,g</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,g12</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E<sub>m,l</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>m,HR</sub></b> <b>(N/mm<sup>2</sup>)</b>
Valor más bajo	4471,2	4650,60	3355,78	13,82	11,103
Valor más alto	11550,6	11915,88	12800,65	73,944	59,39
Valor medio	7783,2	<b>8042,71</b>	<b>7765,53</b>	43,01	<b>34,54</b>
5º percentil	4744,44	<b>4926,56</b>	<b>3714,53</b>	15,89	<b>12,76</b>
Desviación típica	2464,53	2525,18	3282,73	20,03	16,09
Clase resistente			<b>&lt;C14</b>		<b>C10</b>

\* Para la asignación de clase resistente debe aplicarse el factor de corrección k<sub>s</sub> al valor del 5º percentil de la resistencia a flexión calculada.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### Valores estadísticos según resistencia a flexión (MOR):

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 según la resistencia a flexión (MOR) **(86,36% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	47,16	93,74	68,32	50,78	11,90	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	37,88	75,29	54,87	40,79	9,56	<b>C30</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 según la resistencia a flexión (MOR) **(9,09% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	34,70	37,87	36,18	34,76	1,50	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	27,87	30,42	29,06	27,92	1,21	<b>C20</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo según la resistencia a flexión (MOR) **(4,54% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	13,82	19,01	16,41	14,08	3,66	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	11,10	15,27	13,18	11,30	2,94	<b>C08</b>

### Valores estadísticos según módulo de elasticidad (MOE):

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 según el módulo de elasticidad (MOE) **(84,09% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8817,26	14037,20	10947,97	8925,23	1548,17	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8772,43	15558,36	11542,36	8912,80	2012,62	<b>C35</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 según el módulo de elasticidad (MOE) **(11,36% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6734,05	7789,82	7199,47	6770,03	460,22	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6064,26	7436,76	6669,31	6111,04	598,29	<b>C18</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo según el módulo de elasticidad (MOE) **(4,54% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	4650,61	5340,50	4995,55	4685,10	487,82	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	3355,79	4252,65	3804,22	3400,63	634,17	<b>&lt;C14</b>

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.32.** Módulos de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

PROBETA N°	E <sub>m,g</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>m,g12</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>m,l</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m,HR</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
1	15028,20	15552,31	17528,00	99,14	79,63
2	13351,50	13845,51	15309,16	89,71	72,06
3	12978,90	13214,14	14488,38	71,06	57,08
4	8906,91	9042,74	9065,56	56,45	45,34
5	9563,40	10053,52	10379,58	34,056	27,35
6	12006,00	12423,21	13460,17	63,07	50,66
7	14935,00	15310,24	17213,31	100,08	80,39
8	13103,10	13561,71	14940,22	88,20	70,84
9	12668,40	13146,63	14400,62	85,608	68,76
10	12627,00	12996,34	14205,24	62,856	50,49
11	12357,90	12742,54	13875,30	79,704	64,02
12	14220,90	14574,64	16257,03	84,60	67,95
13	12526,45	12756,62	13893,61	77,18	61,99
14	12502,80	12879,45	14053,29	61,344	49,27
15	9116,28	9311,14	9414,48	75,16	60,37
16	10370,70	10723,30	11250,29	70,34	56,50
17	12061,20	12288,86	13285,52	89,20	71,65
18	11736,90	12200,51	13170,66	65,01	52,22
19	13496,40	13963,71	15462,82	96,41	77,44
20	8987,56	9093,16	9131,11	77,76	62,46
21	13165,20	13369,26	14690,04	70,20	56,39
22	14966,100	15355,22	17271,79	89,640	72
23	13732,97	14028,23	15546,70	85,46	68,65
24	11053,80	11350,87	12066,13	61,27	49,21
25	12751,20	13148,08	14402,50	97,20	78,07
26	11277,36	11614,27	12408,55	48,816	39,21
27	10929,60	11286,18	11982,03	74,88	60,14
28	13413,60	13718,76	15144,39	88,92	71,42
29	10650,15	10787,27	11333,45	74,59	59,91
30	15152,40	15694,10	17712,33	99,22	79,69
31	13520,06	13912,14	15395,78	83,02	66,68
32	10598,40	10945,50	11539,15	77,18	62,00
33	9853,20	10147,56	10501,83	74,44	59,79
34	12420,00	12809,68	13962,58	77,40	62,17
35	12451,05	12804,35	13955,66	85,10	68,36
36	12033,60	12370,54	13391,70	91,01	73,10
37	9936,00	10102,43	10443,16	63,43	50,95
38	12047,40	12356,11	13372,94	95,112	76,40
39	10113,43	10380,17	10804,22	63,14	50,72
40	11892,15	12277,16	13270,31	77,61	62,34
41	11364,30	11753,53	12589,59	72,79	58,47
42	9581,14	9738,04	9969,45	59,76	48
43	8219,78	8467,40	8317,62	73,22	58,81
44	9240,48	9379,09	9502,82	72,57	58,29
45	8544,96	8841,90	8804,47	73,08	58,70
46	11053,8	11248,62	11933,21	87,62	70,38
47	8569,8	8852,60	8818,38	73,512	59,05
48	8569,8	8852,60	8818,38	73,512	62,00
49	8716,58	8939,94	8931,92	77,76	62,46
50	12502,8	12884,14	14059,38	67,968	54,59
51	12916,8	13136,39	14387,31	78,12	62,75
52	11954,25	12164,94	13124,42	75,528	60,67

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

- Valores estadísticos globales/según calidades visuales:

Los valores estadísticos para el lote completo correspondiente a la calidad visual ME-1 son los siguientes:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	8197,20	8465,65	8317,62	34,05	27,35
Valor más alto	15152,40	15694,10	17712,33	100,08	80,38
Valor medio	11648,80	11969,17	<b>12869,93</b>	76,73	<b>61,68</b>
5° percentil	8569,8	8852,6	<b>8818,38</b>	58,27	<b>46,80</b>
Desviación típica	1895,33	1959,42	2547,24	13,33	10,70
Clase resistente			<b>C35</b>		<b>C35</b>

Para este lote no es posible realizar un análisis más exhaustivo según calidades visuales dado que el lote completo es de calidad ME-1.

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.33.** Módulo de elasticidad global, local y resistencia a flexión de las probetas de madera vieja: especie *Pinus Sylvestris* L.

PROBETA N°	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	13512,96	13985,91	15491,68	59,11	47,48
2	13697,49	14339,55	15951,42	85,68	68,82
3	11840,4	12234,09	13214,32	58,03	46,61
4	8843,04	9014,37	9028,68	36,50	29,32
5	7638,30	7792,97	7440,86	26,71	21,46
6	8611,20	8803,87	8755,03	24,98	20,07
7	8445,6	8684,18	8599,43	26,28	21,11
8	10060,2	10271,46	10662,90	70,12	56,33
9	8818,2	8963,70	8962,81	30,16	24,23
10	15649,2	16318,20	18523,66	111,45	89,52
11	14904	15366,02	17285,83	96,84	77,78
12	14691,09	15199,76	17069,69	84,09	67,55
13	14691,09	15181,40	17045,82	89,56	71,94
14	13662	13967,68	15467,98	77,18	62,00
15	14438,25	14932,76	16722,59	100,44	80,67
16	13879,35	14077,13	15610,27	90,07	72,35
17	14717,7	15258,57	17146,14	101,01	81,14
18	7593,943	7849,28	7514,06	48,38	38,86
19	7617,6	7793,75	7441,88	54,07	43,43
20	8224,8	8441,72	8284,24	62,06	49,85
21	9119,829	9450,42	9595,55	58,17	46,73
22	10101,6	10346,56	10760,53	52,56	42,22
23	8073	8315,19	8119,75	40,03	32,15
24	8694	9005,89	9017,66	62,78	50,43
25	9936	10129,75	10478,68	64,94	52,16
26	12792,6	13221,15	14497,50	66,81	53,67
27	11868	12164,7	13124,11	88,99	71,48
28	8800,457	9095,27	9133,85	52,27	41,99
29	11887,71	12321,61	13328,09	73,08	58,70
30	11390,91	11800,98	12651,27	69,84	56,10
31	11260,8	11723,90	12551,07	37,15	29,84
32	9758,571	9872,01	10143,61	58,82	47,25
33	12999,6	13529,33	14898,13	67,03	53,84
34	11426,4	11600,65	12390,85	68,11	54,71
35	10681,2	11096,43	11735,36	32,76	26,31
36	11954,25	12190,34	13157,44	76,82	61,71
37	12384,51	12817,97	13973,36	87,55	70,32

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### ■ Valores estadísticos globales:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	7593,943	7849,28	7514,06	24,98	20,07
Valor más alto	15649,20	16318,2	18523,66	111,45	89,52
Valor medio	11207,18	11544,83	<b>12318,27</b>	64,61	<b>51,90</b>
5° percentil	7634,16	7838,17	<b>7499,62</b>	26,62	<b>21,39</b>
Desviación típica	2473,35	2588,21	3364,68	23,07	18,53
Clase resistente			<b>C24</b>		<b>C16</b>

### ■ Valores estadísticos según calidades visuales:

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 **(43,24% del lote)** son:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	8224,8	8441,72	8284,24	37,15	29,84
Valor más alto	15649,2	16318,2	18523,66	111,45	89,52
Valor medio	12022,96	12392,96	<b>13420,85</b>	74,51	<b>59,85</b>
5° percentil	8656,54	8931,88	<b>8921,44</b>	48,49	<b>38,95</b>
Desviación típica	2218,97	2345,82	3049,56	19,54	15,69
Clase resistente			<b>C35</b>		<b>C30</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 **(29,72% del lote)** son:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	7593,943	7849,28	7514,06	24,98	20,07
Valor más alto	14691,09	15181,4	17045,82	100,44	80,67
Valor medio	11672,65	12033,86	<b>12954,02</b>	67,21	<b>53,98</b>
5° percentil	7833,47	8082,23	<b>7816,90</b>	32,50	<b>26,11</b>
Desviación típica	2764,98	2853,72	3709,84	23,68	19,02
Clase resistente			<b>C24</b>		<b>C20</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo **(27,02% del lote)** son:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	7617,6	7793,75	7441,88	26,28	21,11
Valor más alto	12999,6	13529,33	14898,13	70,12	56,33
Valor medio	9389,93	9649,86	<b>9854,82</b>	45,89	<b>36,86</b>
5° percentil	7626,92	7793,32	<b>7441,32</b>	26,47	<b>21,26</b>
Desviación típica	1628,36	1736,20	2257,06	17,29	13,88
Clase resistente			<b>C24</b>		<b>C16</b>



**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

■ Valores estadísticos según resistencia a flexión (MOR):

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 según la resistencia a flexión (MOR) **(78,37% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	48,38	111,45	73,65	52,38	16,87	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	38,86	89,52	59,16	42,08	13,55	<b>C30</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 según la resistencia a flexión (MOR) **(10,81% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	32,76	40,03	36,61	33,32	2,99	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	26,31	32,15	29,40	26,76	2,40	<b>C18</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo según la resistencia a flexión (MOR) **(10,81% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	24,98	30,16	27,03	25,17	2,21	
$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )	20,07	24,23	21,71	20,22	1,77	<b>C14</b>

■ Valores estadísticos según módulo de elasticidad (MOE):

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-1 según módulo de elasticidad (MOE) **(91,89% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8315,19	16318,2	11874,19	8599,31	2435,01	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8119,75	18523,66	12746,45	8489,11	3165,51	<b>C27/C30</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad ME-2 según módulo de elasticidad (MOE) **(8,11% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	7792,97	7849,28	7812	7793,04	32,28	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	7440,86	7514,06	7465,6	7440,96	41,97	<b>C24</b>

Los valores estadísticos para las probetas de calidad Rechazo según módulo de elasticidad (MOE) **(0% del lote)**:

	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	5° percentil	Desviación típica	Clase resistente
$E_{m,g12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	
$E_{m,l}$ (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-

### Discusión de resultados y conclusiones:

#### Madera nueva:

1. Según los resultados estadísticos de los ensayos mecánicos y sin atender a criterios de clasificación visual, es posible asignar para el lote de madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) una clase resistente C18, según módulo de elasticidad, y una clase resistente C20, según la resistencia a flexión. En este lote se recogen piezas con calidades visuales ME-1, ME-2 y piezas rechazadas por la norma denominadas Rechazo.
2. Si atendemos a una discriminación por calidades visuales es posible mejorar el rendimiento clasificatorio. En este caso, las clases resistentes asignadas según los resultados de ensayos mecánicos para los lotes de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son superiores a las clases resistentes asignadas según criterios de calidad visual por la norma UNE 56544.
  - a. Para el lote de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y calidad ME-1 dicha norma asigna una clase resistente C27 mientras que, según resultados de ensayos mecánicos, es posible asignar una clase resistente C35, según módulo de elasticidad y C30 según la resistencia a flexión.
  - b. Para el lote de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y calidad ME-2 la norma UNE 56544 asigna una clase resistente C18 mientras que, según resultados de ensayos mecánicos, es posible asignar una clase resistente C24 atendiendo al valor del 5º percentil del módulo de elasticidad y una C27 según el 5º percentil de los valores de resistencia a flexión.
  - c. Para el lote de piezas de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) que la norma de clasificación visual rechaza por sus defectos es posible asignar una clase resistente C10.
3. Si se emplean como variables clasificatorias los resultados de los ensayos mecánicos, MOR o MOE, con independencia de las calidades visuales de las piezas el rendimiento clasificatorio mejora sustancialmente.
  - a. Según los valores del 5º percentil de la resistencia a flexión, MOR, el 86,36% de las piezas del lote son de calidad ME-1 (clase resistente C27 o superior), el 9,09% son de calidad ME-2 (clase resistente C18 o superior) y el 4,54% serían rechazables con una clase resistente C08.
  - b. Según los valores del 5º percentil del módulo de elasticidad, MOE, el 84,09% de las piezas del lote son de calidad ME-1, el 11,36% de calidad ME-2 y el 4,54% serían rechazables.

Estos resultados se contraponen con los porcentajes obtenidos según criterios de clasificación visual. En este caso, recordamos, el 52,27% de las piezas son de calidad ME-1, el 27,27% de calidad ME-2 y el 20,45% son rechazadas.

4. Para el lote de madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y calidad ME-1 la clase resistente asignada según los resultados de los ensayos mecánicos es C35. Esta clase resistente es superior a la clase resistente asignada por la norma UNE 56544 que, según criterios de clasificación visual, otorga una clase resistente C30<sup>3</sup>.
5. Estos resultados demuestran el carácter conservador de esta norma, conclusión en la que coincidimos con otros autores (Acuña et al., 2006).

---

<sup>3</sup> El lote de madera de pino laricio solo contiene piezas de calidad ME-1 por lo que no es posible dar una clase resistente global ni pormenorizada para el resto de calidades visuales, ME-2 y/o Rechazo.

Madera vieja:

1. Según los resultados estadísticos de los ensayos mecánicos y sin atender a criterios de clasificación visual, es posible asignar para el lote de madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) una clase resistente C24 (según el módulo de elasticidad paralelo) y una clase resistente C16 (según la resistencia a flexión). En este lote se recogen piezas con calidades visuales ME-1, ME-2 y piezas rechazadas en la norma. Comparando estos resultados con los resultados obtenidos en madera nueva se deduce que, si la madera se encuentra en buen estado, las propiedades mecánicas de la madera nueva y vieja son similares. En estos resultados coincidimos con otros autores (Lourenço et al., 2007) que demostraron que la madera nueva y vieja de castaño tiene propiedades mecánicas similares.
2. De la misma manera que para el lote de madera nueva de esta especie, al realizar una discriminación según calidades visuales se mejora el rendimiento clasificatorio. Las clases resistentes asignadas a partir de los resultados de ensayos mecánicos para los lotes de madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son superiores a las clases resistentes asignadas según las calidades visuales de la norma UNE 56544.
  - a. Para el lote de calidad ME-1 la norma asigna una clase resistente C27 mientras que, según resultados de ensayos mecánicos, es posible asignar una clase resistente C35 según el módulo de elasticidad y una clase resistente C30 según la resistencia a flexión.
  - b. Para el lote de calidad ME-2 la norma UNE 56544 asigna una clase resistente C18 mientras que, según resultados de ensayos mecánicos, es posible asignar una clase resistente C24, atendiendo al valor del 5º percentil del módulo de elasticidad, y una C20 según el 5º percentil de la resistencia a flexión.
  - c. Para el lote de piezas de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) que la norma de clasificación visual rechaza por el número y tamaño de sus defectos es posible asignar una clase resistente C24, según el 5º percentil del módulo de elasticidad, y una C16, según resistencia a flexión. La presencia de piezas que responden a esta clasificación es habitual en las estructuras preexistentes que nos encontramos en las obras de rehabilitación. Muchas de estas estructuras, a pesar de no estar contempladas en norma, han estado en servicio durante años e incluso siglos. Por todo ello, son necesarias otras herramientas para complementar las labores de diagnóstico del arquitecto.
3. Asimismo, si se emplean como variables clasificatorias los resultados de los ensayos mecánicos, MOR o MOE, con independencia de las calidades visuales de las piezas el rendimiento clasificatorio en un lote mejora sustancialmente.
  - a. Según los valores del 5º percentil de la resistencia a flexión, MOR, el 78,37% de las piezas del lote son de calidad ME-1 (clase resistente C27 o superior), el 10,81% son de calidad ME-2 (clase resistente C18 o superior) y el 10,81% serían rechazables con una clase resistente C08.
  - b. Según los valores del 5º percentil del módulo de elasticidad, MOE, el 91,89% de las piezas del lote son de calidad ME-1 y el 8,11% de calidad ME-2. Ninguna de las piezas serían rechazables.

Estos resultados se contraponen con los porcentajes obtenidos según criterios de clasificación visual. En este caso, recordamos, el 43,24% de las piezas son de calidad ME-1, el 29,72% de calidad ME-2 y el 27,02% son rechazadas.

4. Estos resultados ratifican las conclusiones del apartado anterior, demostrando el carácter conservador de esta norma.

### VI.2.1.1.3. CORRELACIONES DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

En este apartado se estudian las relaciones que existen entre los resultados de los ensayos no destructivos, propiedades físicas, clasificación visual y velocidades de ultrasonidos, y los parámetros resistentes, módulo de elasticidad y resistencia a flexión, obtenidos de los ensayos destructivos.

La obtención de estas correlaciones se ha realizado a partir del banco de datos compuesto por los resultados experimentales mostrados. En este banco de datos cada una de las probetas ha sido clasificada en función de su especie (pino silvestre o laricio) y su calidad visual (ME-1, ME-2 y R), y ensayada a flexión según norma UNE 408:2004, obteniendo los parámetros resistentes, módulo de elasticidad y resistencia a flexión, que las definen. Todos los resultados han sido mostrados en capítulos anteriores.

Se ha considerado adecuado discriminar en estas correlaciones por especie y calidad visual. Los resultados expuestos han demostrado que, en madera sana, las propiedades físicas y mecánicas de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) no difieren a lo largo del tiempo. Por esto se considera correcto extraer, además de las correlaciones para madera nueva y vieja, un grupo de correlaciones único para la madera de pino silvestre en buen estado, englobando ambos lotes. Asimismo, se extraen las correlaciones necesarias en la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). En este caso, estas correlaciones son aplicables únicamente para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) de calidad ME-1 dado que la totalidad de las probetas del lote utilizado pertenecen a esta calidad visual. De esta manera los resultados serán comparables con las correlaciones obtenidas para la calidad ME-1 de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

Siguiendo estas premisas, las correlaciones obtenidas para cada lote atienden a dos criterios:

- Obtención de las correlaciones para el conjunto de probetas del lote. De esta forma no se atienden los criterios de clasificación visual.
- Obtención de correlaciones según calidades visuales, ME-1, ME-2 y R. Las velocidades longitudinales no detectan con fiabilidad los defectos de la madera (nudos, fendas,...) con lo que establecer las correlaciones propias de cada calidad visual mejora la fiabilidad de las predicciones de los parámetros resistentes.

Siguiendo estos criterios para cada caso, se obtienen:

- Relación entre la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad estático.
- Relación entre la velocidad longitudinal y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático.

A continuación se muestran las correlaciones obtenidas por especies pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) y calidades visuales.

Las correlaciones de los ensayos de ultrasonidos con parámetros resistentes ponen de manifiesto que, para la madera sana, la velocidad longitudinal de ultrasonidos ( $V_L$ ) es la variable que permite obtener un mejor ajuste de la recta de regresión.

#### VI.2.1.1.3.A. CORRELACIONES PARA LA ESPECIE *PINUS SYLVESTRIS* L.

##### VI.2.1.1.3.A.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR)

Madera nueva y vieja, correlación global (*Pinus Sylvestris* L)

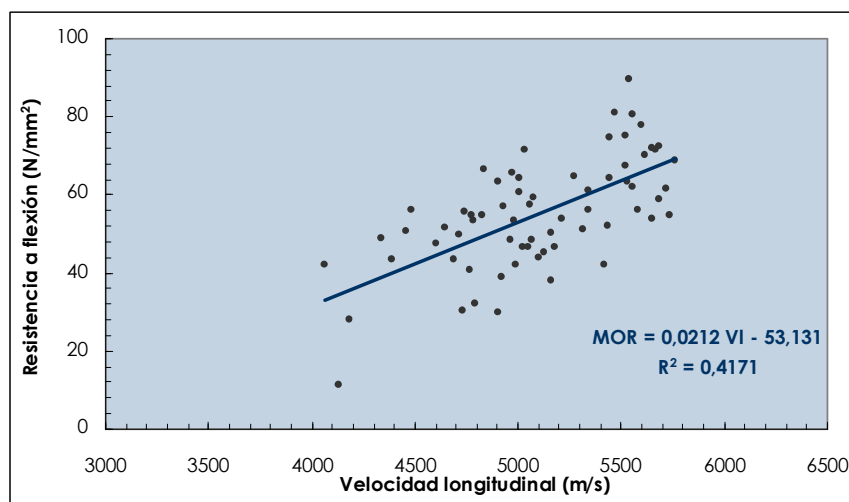


Figura VI.56. Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

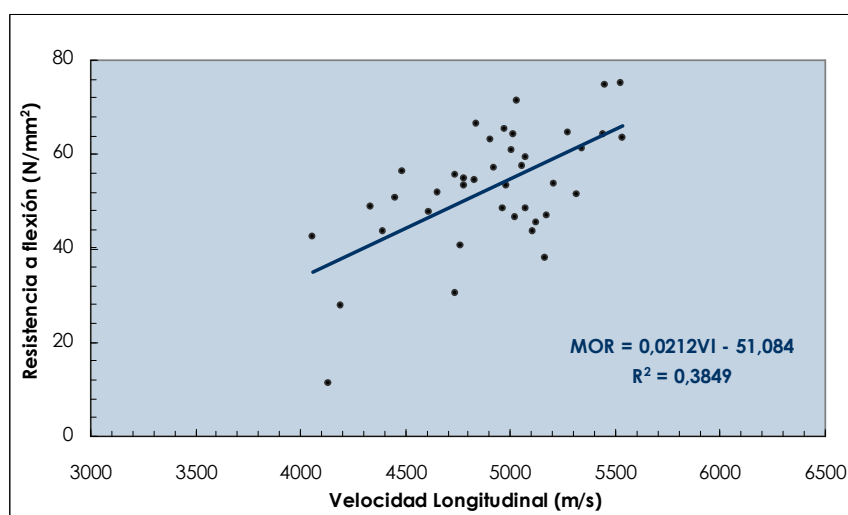
Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
81 (44+37)	11,1	89,52	51,21	52,16	16,15
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR = 0,0212 VI - 53,131				$3,61 \cdot 10^{-9}$	0,4171

Madera nueva y vieja, correlación según calidades visuales (*Pinus Sylvestris* L)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
38 (22+16)	MOR = 0,0154 VI - 19,465	0,000567	0,3140
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
24 (13+11)	MOR = 0,0122 VI - 10,406	0,021478	0,2179
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
19 (9+10)	MOR = 0,0065 VI + 3,6221	0,341697	0,0533

Madera nueva, correlación global



**Figura VI.57.** Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
44	11,1	75,3	50,63	52,625	14,09
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0212 VI - 51,084				1,95 · 10 <sup>-5</sup>	0,3849

Madera nueva, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
22	MOR = 0,0159 VI - 21,754	0,005767	0,3232
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
13	MOR = 0,0056 VI + 23,02	0,312502	0,0924
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
9	MOR = 0,0091 VI - 7,1057	0,540999	0,0557

Madera vieja, correlación global

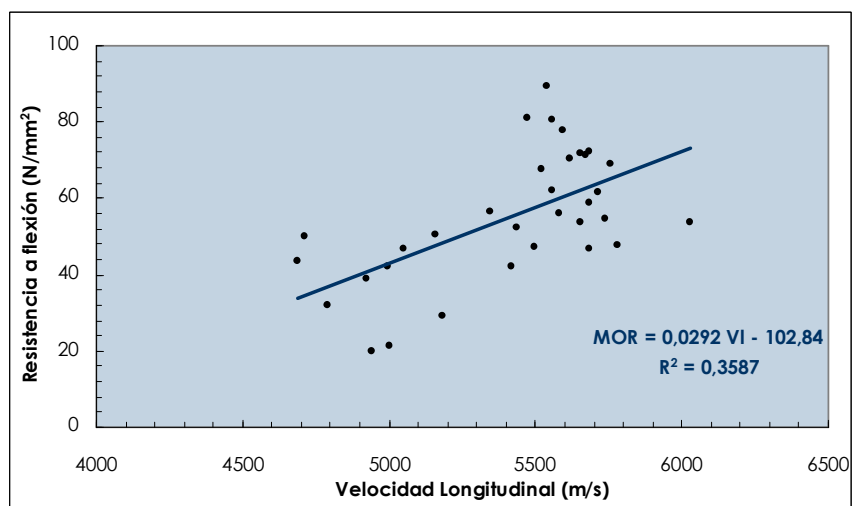


Figura VI.58. Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
37	20,07	89,52	51,89	52,16	18,28
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR = 0,0292 VI - 102,084				0,000231	0,3587

Madera vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
16	MOR = 0,0164 VI - 27,828	0,299235	0,0893
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
11	MOR = 0,031 VI - 110,64	0,057995	0,4227
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
10	MOR = 0,0143 VI - 32,198	0,297419	0,2129

### VI.2.1.1.3.A.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE)

Madera nueva y vieja, correlación global

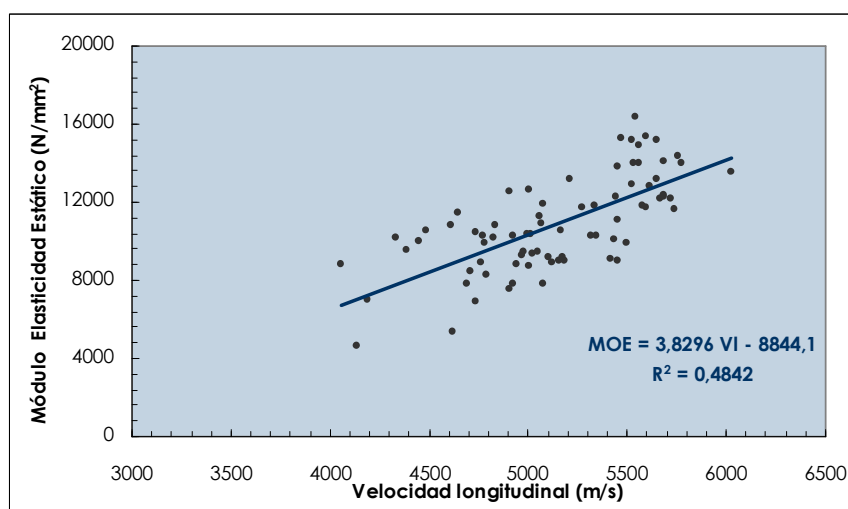


Figura VI.59. Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva y vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
81 (44+37)	4650,61	16318,2	10842,24	10422,17	2439,19
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOE = 3,8296 $V_L$ - 8844,1				$2,51 \cdot 10^{-12}$	0,4842

Madera nueva y vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
38 (22+16)	MOE = 2,9559 VI - 3761,9	0,000101	0,3464
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
24 (13+11)	MOE = 2,7588 VI - 3009,4	0,000719	0,4122
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
19 (9+10)	MOE = 3,4719 VI - 3260,7	0,011136	0,3229



Madera nueva, correlación global (*Pinus Sylvestris* L)

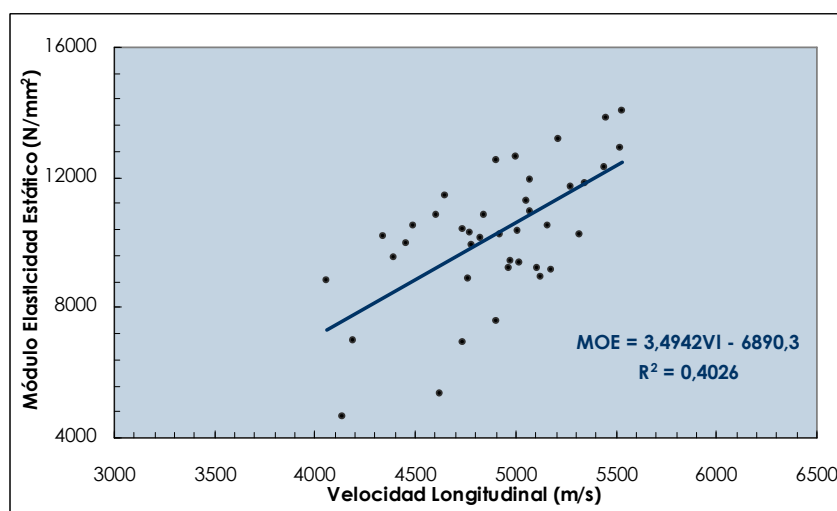


Figura VI.60. Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
44	4650,61	14037,2	10251,44	10282,51	2169,74
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOE = 3,4942 VI - 6890,3				$1,05 \cdot 10^{-5}$	0,4026

Madera nueva, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
22	MOE = 3,165 VI – 4652,1	0,000949	0,4284
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
13	MOE = 1,303 VI + 3938,3	0,143668	0,1839
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
9	MOE = 3,334 VI + 6695,4	0,275250	0,1936

Madera vieja, correlación global

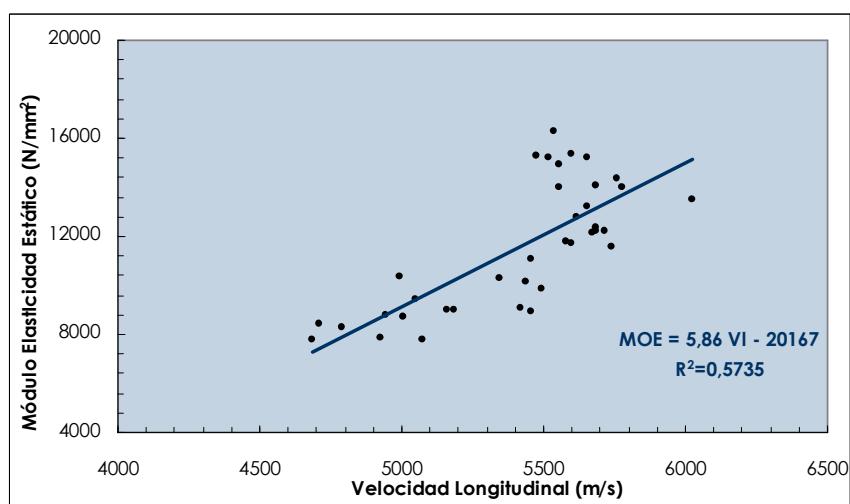


Figura VI.61. Relación entre la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos y el módulo de elasticidad estático para la madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
37	7792,97	16318,2	11544,82	11723,9	2553,00
	Ecuación de regresión			P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
	MOE = 5,86 VI - 20167			$5,79 \cdot 10^{-8}$	0,5735

Madera vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
16	MOE = 4,5095 VI - 12572	0,065696	0,2216
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
11	MOE = 7,143 VI - 26446	2,49 ·10 <sup>-05</sup>	0,8734
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
10	MOE = 4,0276 VI - 11450	0,002341	0,7059

### VI.2.1.1.3.A.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOR) y la resistencia a flexión (MOE)

Madera nueva y vieja, correlación global

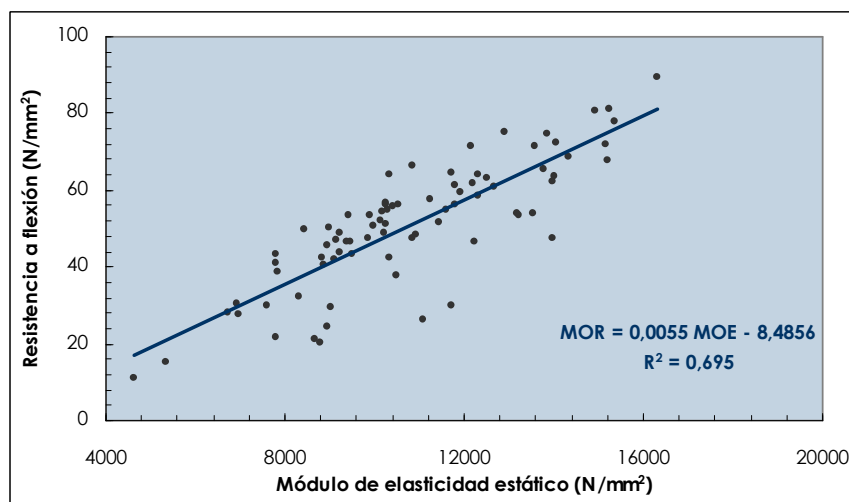


Figura VI.62. Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
81 (44+37)	11,1	75,3	50,63	52,625	14,09
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0055 MOE - 8,4856				3,46 · 10 <sup>-22</sup>	0,695

Madera nueva y vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
38 (22+16)	MOR = 0,0048 MOE + 4,0449	2,85 · 10 <sup>-11</sup>	0,7328
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
24 (13+11)	MOR = 0,0053 MOE - 7,1937	1,92 · 10 <sup>-08</sup>	0,7687
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
19 (9+10)	MOR = 0,0049 MOE - 7,6565	0,000216	0,5626

Madera nueva, correlación global

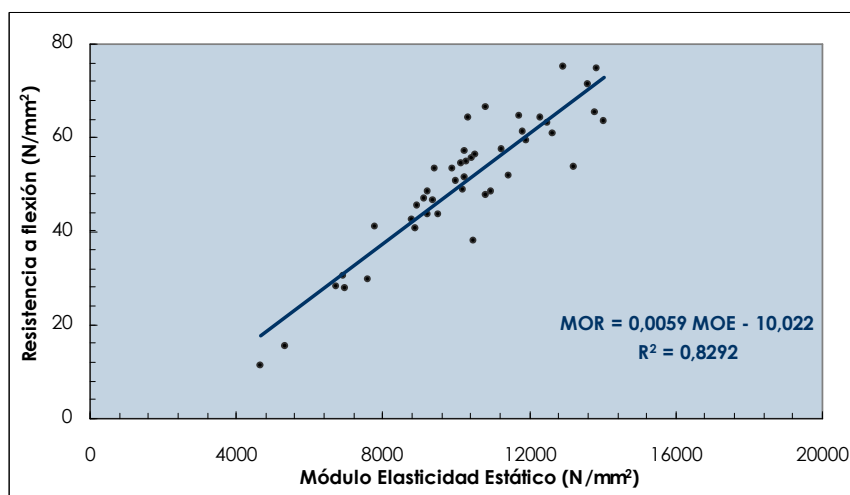


Figura VI.63. Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
44	11,1	75,3	50,63	52,625	14,09
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0059 MOE - 10,022				$1,01 \cdot 10^{-17}$	0,8292

Madera nueva, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
22	MOR = 0,0043 MOE + 10,125	9,46 ·10 <sup>-05</sup>	0,5417
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
13	MOR = 0,0053 MOE - 4,5506	6,91 ·10 <sup>-05</sup>	0,7763
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
9	MOR = 0,0063 MOE - 16,073	7,10 ·10 <sup>-07</sup>	0,9752

Madera vieja, correlación global

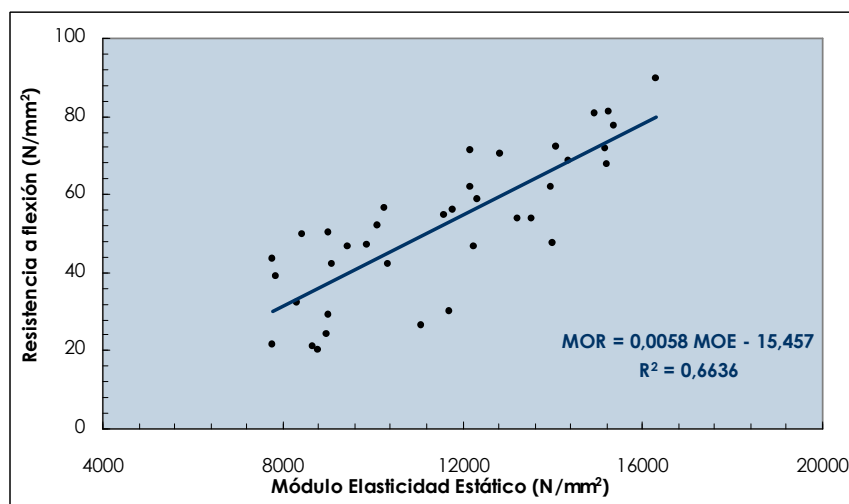


Figura VI.64. Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
37	20,07	89,52	51,89	52,16	18,28
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR = 0,0058 MOE - 15,457				$8,52 \cdot 10^{-10}$	0,6636

Madera vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
16	MOR = 0,0054 MOE - 5,1496	0,000664	0,6332
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
11	MOR = 0,006 MOE - 18,718	0,000120	0,8214
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
10	MOR = 0,0038 MOE + 0,3102	0,166821	0,2242

**VI.2.1.1.3.A.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión (MOR)**

El módulo de elasticidad dinámico de la madera puede obtenerse a partir de la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos mediante la siguiente expresión:

$$E_d = V_L^2 \cdot d$$

siendo;

- $E_d$  Módulo de elasticidad dinámico expresado en  $N/m^2$ .
- $V_L$  Velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos en la dirección de las fibras expresada en  $m/s$ .
- $d$  Densidad de la madera en  $Kg/m^3$ .

La velocidad de transmisión longitudinal de ultrasonidos y la densidad deben estar referidas al mismo contenido de humedad. En este trabajo todas las mediciones están referidas al 12% de humedad.

Madera nueva y vieja, correlación global

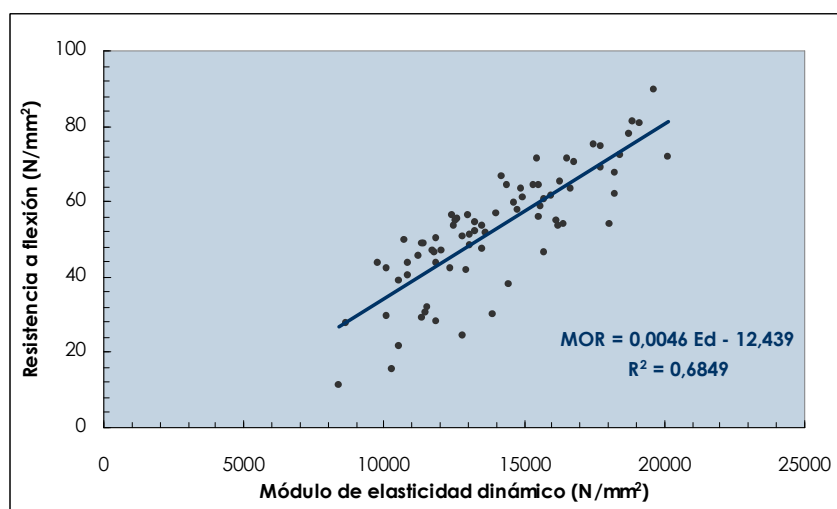


Figura VI.65. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera nueva y vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
81 (44+37)	11,1	89,52	51,21	52,16	16,15
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0046 Ed - 12,439				5,48 · 10 <sup>-20</sup>	0,6849

Madera nueva y vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
38 (22+16)	MOR = 0,0041 Ed - 0,7221	1,64 ·10 <sup>-11</sup>	0,7353
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
24 (13+11)	MOR = 0,0034 Ed + 3,9391	2,73 ·10 <sup>-06</sup>	0,6397
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
19 (9+10)	MOR = 0,0029 Ed + 0,3324	0,037521	0,2304

Madera nueva, correlación global

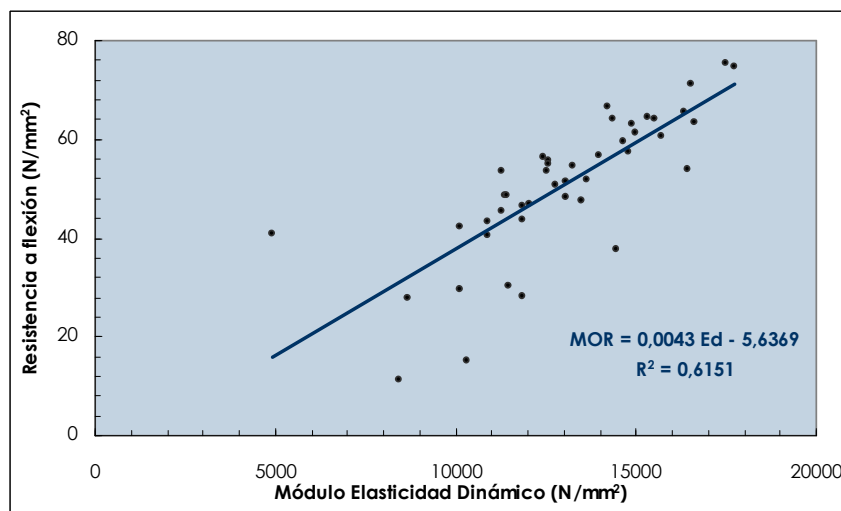


Figura VI.66. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
44	11,1	75,3	50,63	52,625	14,09
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0043 Ed - 5,6369				1,49 · 10 <sup>-10</sup>	0,6151

Madera nueva, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
22	MOR = 0,0037 Ed + 6,3343	9,93·10 <sup>-07</sup>	0,706
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
13	MOR = 0,0027 Ed + 15,949	0,005878	0,5131
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
9	MOR = 0,0061 Ed - 33,102	0,014351	0,5992



Madera vieja, correlación global

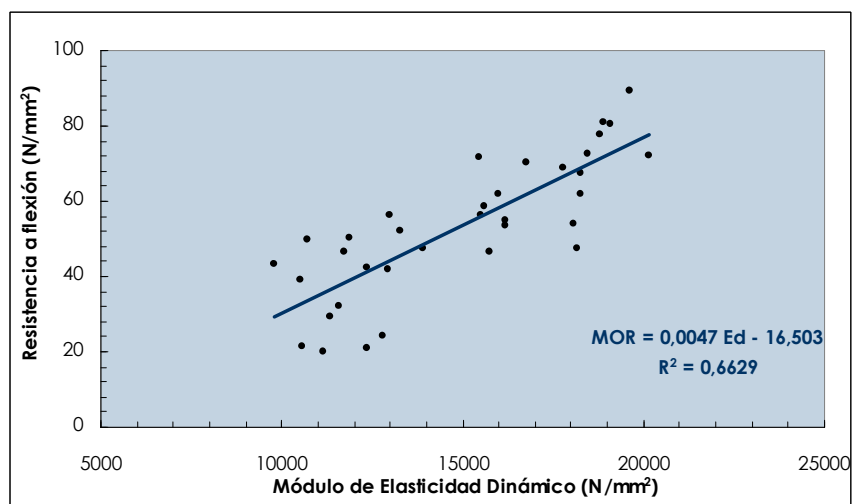


Figura VI.67. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión para la madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

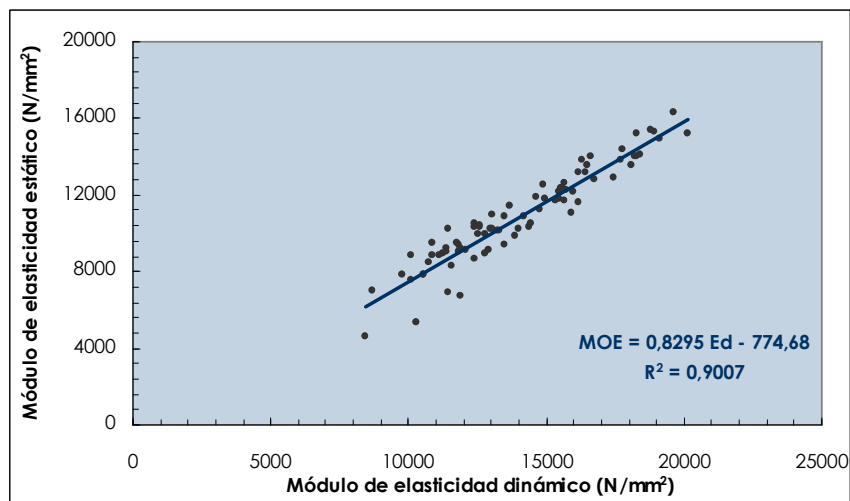
Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
37	20,07	89,52	51,89	52,16	18,28
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOR = 0,0047 Ed - 16,503				2,69 · 10 <sup>-09</sup>	0,6629

Madera vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
16	MOR = 0,0048 Ed - 12,418	5,17 · 10 <sup>-05</sup>	0,7573
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
11	MOR = 0,0048 Ed - 20,53	0,000102	0,8276
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
10	MOR = 0,0026 Ed + 6,1647	0,255424	0,1798

**VI.2.1.1.3.A.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (MOE)**

*Madera nueva y vieja, correlación global*



**Figura VI.68.** Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva y vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
81 (44+37)	4650,61	16318,2	10842,24	10422,17	2439,19
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOE = 0,8295 Ed - 774,68				$7,25 \cdot 10^{-41}$	0,9007

*Madera nueva y vieja, correlación según calidades visuales*

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
38 (22+16)	MOE = 0,8009 Ed - 220,5	1,81 ·10 <sup>-19</sup>	0,8985
Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
24 (13+11)	MOE = 0,6647 Ed + 1766,5	3,90 ·10 <sup>-12</sup>	0,8926
Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
19 (9+10)	MOE = 0,8047 Ed - 790,24	3,28 ·10 <sup>-06</sup>	0,7293

Madera nueva, correlación global

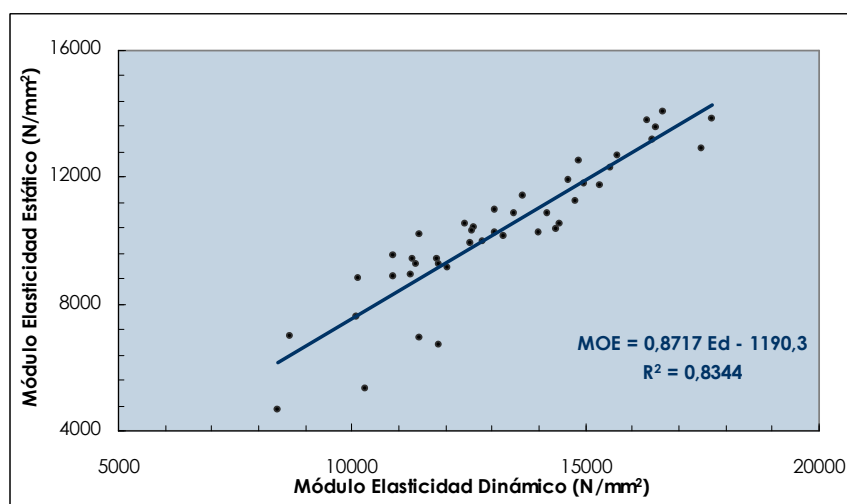


Figura VI.69. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera nueva de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
44	4650,61	14037,2	10251,44	10282,51	2169,74
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOE = 0,8717 Ed - 1190,3				1,94 · 10 <sup>-17</sup>	0,8344

Madera nueva, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
22	MOE = 0,711 Ed + 1248	1,08 · 10 <sup>-10</sup>	0,8807

Calidad ME-2

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
13	MOE = 0,8408 Ed - 782,37	2,67 · 10 <sup>-07</sup>	0,9362

Rechazo

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
9	MOE = 0,972 Ed - 2802,3	0,011139	0,6256

Madera vieja, correlación global

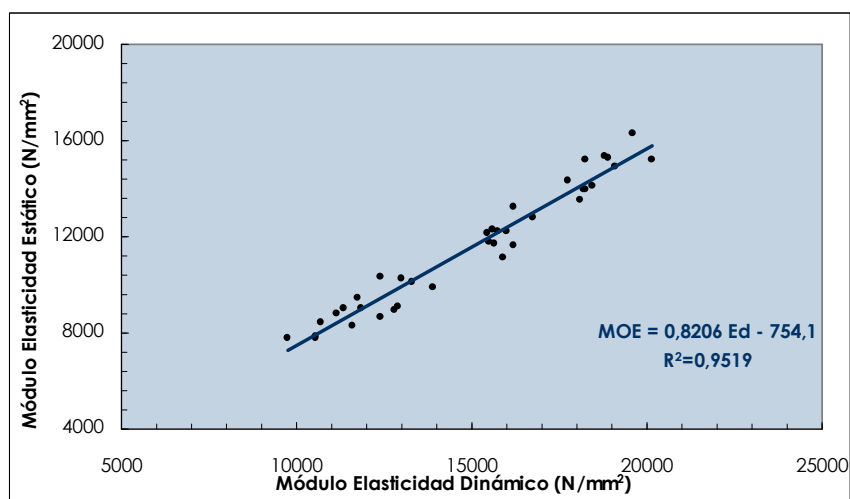


Figura VI.70. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático para la madera vieja de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

Los datos estadísticos correspondientes a esta regresión son:

Nº valores	Valor más bajo	Valor más alto	Valor medio	Mediana	Desviación típica
37	7792,97	16318,2	11544,82	11723,9	2553,00
Ecuación de regresión				P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
MOE = 0,8206 Ed - 754,1				$1,20 \cdot 10^{-24}$	0,9519

Madera vieja, correlación según calidades visuales

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
16	MOE = 0,9361 Ed - 2570,2	1,40·10 <sup>-10</sup>	0,9512

Calidad ME-2			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
11	MOE = 0,7834 Ed - 122,67	7,69·10 <sup>-09</sup>	0,9788

Rechazo			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
10	MOE = 0,6627 Ed + 1159,4	3,97·10 <sup>-05</sup>	0,8914

#### VI.2.1.1.3.B. CORRELACIONES PARA LA ESPECIE *PINUS NIGRA* Arnold

##### VI.2.1.1.3.B.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$MOR = 0,0076 V_L + 28,786$	$1,16 \cdot 10^{-05}$	0,40

##### VI.2.1.1.3.B.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$MOE = 4,3454 V_L - 9997,5$	$5,59 \cdot 10^{-14}$	0,85

##### VI.2.1.1.3.B.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOE) y la resistencia a flexión (MOR)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$MOR = 0,0047 MOE + 2,3529$	$6,47 \cdot 10^{-08}$	0,53

##### VI.2.1.1.3.B.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión (MOR)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$MOR = 0,0015 E_d + 44,225$	$4,90 \cdot 10^{-07}$	0,49

##### VI.2.1.1.3.B.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (MOE)

Calidad ME-1			
Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$MOE = 0,6982 E_d + 721,38$	$4,18 \cdot 10^{-15}$	0,87

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se han obtenido las correlaciones necesarias para obtener, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos ( $V_L$ ) y la densidad ( $d$ ), los parámetros resistentes (MOR, MOE) de la madera sana de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Con ello se tiene:

<b>MOR = 0,0212 <math>V_L</math> - 53,131</b>	<b><math>R^2=0,41</math></b>
<b>MOE = 3,8296 <math>V_L</math> - 8844,1</b>	<b><math>R^2=0,48</math></b>
<b>MOR = 0,0055 MOE - 8,4856</b>	<b><math>R^2=0,69</math></b>
<b>MOR = 0,0046 <math>E_d</math> - 12,439</b>	<b><math>R^2=0,68</math></b>
<b>MOE = 0,8295 <math>E_d</math> - 774,68</b>	<b><math>R^2=0,90</math></b>

Por calidades visuales:

- Calidad ME-1

<b>MOR = 0,0154 <math>V_L</math> - 19,465</b>	<b><math>R^2=0,31</math></b>
<b>MOE = 2,9559 <math>V_L</math> - 3761,9</b>	<b><math>R^2=0,34</math></b>
<b>MOR = 0,0048 MOE + 4,0449</b>	<b><math>R^2=0,73</math></b>
<b>MOR = 0,0041 <math>E_d</math> - 0,7221</b>	<b><math>R^2=0,73</math></b>
<b>MOE = 0,8009 <math>E_d</math> - 220,5</b>	<b><math>R^2=0,89</math></b>

- Calidad ME-2

<b>MOR = 0,0122 <math>V_L</math> - 10,406</b>	<b><math>R^2=0,21</math></b>
<b>MOE = 2,7588 <math>V_L</math> - 3009,4</b>	<b><math>R^2=0,41</math></b>
<b>MOR = 0,0053 MOE - 7,1937</b>	<b><math>R^2=0,76</math></b>
<b>MOR = 0,0034 <math>E_d</math> + 3,9391</b>	<b><math>R^2=0,63</math></b>
<b>MOE = 0,6647 <math>E_d</math> + 1766,5</b>	<b><math>R^2=0,89</math></b>

- Rechazo

<b>MOR = 0,0065 <math>V_L</math> + 3,6221</b>	<b><math>R^2=0,05</math></b>
<b>MOE = 3,4719 <math>V_L</math> - 3260,7</b>	<b><math>R^2=0,32</math></b>
<b>MOR = 0,0049 MOE - 7,6565</b>	<b><math>R^2=0,56</math></b>
<b>MOR = 0,0029 <math>E_d</math> + 0,3324</b>	<b><math>R^2=0,23</math></b>
<b>MOE = 0,8047 <math>E_d</math> - 790,24</b>	<b><math>R^2=0,72</math></b>

2. Asimismo, para la madera sana de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) se han obtenido las correlaciones para obtener los parámetros resistentes de la madera de calidad visual ME-1:

<b>MOR = 0,0076 <math>V_L</math> + 28,786</b>	<b><math>R^2=0,40</math></b>
<b>MOE = 4,3454 <math>V_L</math> - 9997,5</b>	<b><math>R^2=0,85</math></b>
<b>MOR = 0,0047 MOE + 2,3529</b>	<b><math>R^2=0,53</math></b>
<b>MOR = 0,0015 <math>E_d</math> + 44,225</b>	<b><math>R^2=0,50</math></b>
<b>MOE = 0,6982 <math>E_d</math> + 721,38</b>	<b><math>R^2=0,87</math></b>

Siendo en cada caso;

MOR Resistencia de rotura en flexión en N/mm<sup>2</sup>.  
 MOE Módulo de elasticidad estático en flexión en N/mm<sup>2</sup>.  
 $V_L$  Velocidad longitudinal de ultrasonidos en m/s.  
 $E_d$  Módulo de elasticidad dinámico en N/mm<sup>2</sup>.

3. En las correlaciones obtenidas para ambas especies se observa que, de modo general, al introducir la variable de la densidad a partir del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d = V_L^2 \cdot d$ ), las correlaciones mejoran considerablemente. Esto significa que la densidad es de suma importancia para obtener unas correlaciones fiables. De esta forma coincidimos con las conclusiones obtenidas por otros autores (Lourenço et al., 2007) para otros parámetros resistentes (resistencia a compresión) de otras especies de madera (castaño).

4. Las correlaciones obtenidas entre la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) arrojan unos coeficientes de correlación ( $R^2$ ) más interesantes que los obtenidos entre la velocidad longitudinal de ultrasonidos y el módulo de rotura (MOR). Tanto el módulo de elasticidad (MOE) como la velocidad longitudinal de ultrasonidos aportan información global de la pieza mientras que el módulo de rotura (MOR) puede deberse a un defecto local que no tiene influencia dominante sobre la velocidad. En estas conclusiones coincidimos con Sandoz (Sandoz, 1989).
5. Al bajar la calidad visual de la muestra (más defectos) baja el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) entre la velocidad de ultrasonidos y el módulo de rotura (MOR). De este modo, para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se obtienen unos coeficientes ( $R^2$ ) de 0,31, 0,21 y 0,05 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
6. De igual modo, al bajar la calidad visual de la muestra (más defectos) baja la correlación ( $R^2$ ) entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y el módulo de rotura (MOR). De este modo, para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se obtienen unos coeficientes ( $R^2$ ) de 0,73, 0,63 y 0,23 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
7. Las correlaciones obtenidas entre la velocidad longitudinal de ultrasonidos y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) son similares para todas las calidades visuales, 0,32, 0,41 y 0,32 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
8. De igual modo, las correlaciones obtenidas entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ), y el módulo de elasticidad estático (MOE) aportan valores muy similares para todas las calidades visuales, 0,89, 0,89 y 0,72 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
9. Al obtener los parámetros resistentes dando valores a las ecuaciones matemáticas aportadas para la calidad visual ME-1 de ambas especies obtenemos que:

- Para una velocidad longitudinal de 4000 m/s se obtienen unos valores:

Pino silvestre:

MOR: 42,135 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 8061,7 N/mm<sup>2</sup>

Pino laricio:

MOR: 59,186 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 7384,1 N/mm<sup>2</sup>

- Para una velocidad longitudinal de 5000 m/s se obtienen unos valores:

Pino silvestre:

MOR: 57,535 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 11017,6 N/mm<sup>2</sup>

Pino laricio:

MOR: 66,786 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 11729,5 N/mm<sup>2</sup>

Estos resultados demuestran que las ecuaciones obtenidas en cada caso aportan características mecánicas distintas para cada especie. De estos resultados se deduce que ambas correlaciones no pueden usarse indistintamente pues la madera de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es más resistente que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). De este modo, si no es posible hacer una identificación anatómica de la especie se aplicarán las correlaciones obtenidas para la madera de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) encontrándonos, de este modo, del lado de la seguridad.

## VI.2.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS

Los resultados de todos los ensayos (destructivos y no destructivos) realizados con pequeñas probetas se recogen en los apartados siguientes. Para estos ensayos se ha utilizado un único lote de probetas de madera nueva:

Madera nueva:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm³)
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	41	20x20x300

Los ensayos con pequeñas probetas de la especie *Pinus Sylvestris* L fueron realizados en trabajos precedentes del grupo de investigación (Rubio de Hita, 1997). Sus resultados son recogidos en el análisis comparativo de la discusión de resultados.

### VI.2.1.2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

A continuación se exponen los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos:

- Determinación de las propiedades físicas (densidad y humedad).
- Medición de la velocidad de transmisión de ultrasonidos en las direcciones normal, tangencial y longitudinal.

#### VI.2.1.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas

Los resultados de las propiedades físicas de las probetas comprende la determinación de sus valores de densidad y humedad.

##### *Humedad*

La medición del contenido de humedad se ha realizado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002. Los resultados son utilizados para la corregir los resultados de otras variables como la densidad o la velocidad de ultrasonidos.

##### *Densidad*

Se ha determinado la densidad de cada una de las probetas como resultado de la relación entre la masa y el volumen de las mismas. Esta magnitud está condicionada por el contenido de humedad, por lo que, para poder comparar cuantitativamente los resultados se han referido todos los valores a un contenido de humedad único, 12% ( $D_{12\% \text{ HUMEDAD}}$ ) aplicando la corrección establecida en la norma UNE 384:2010. Esta norma especifica: “Cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad”.

Los resultados se recogen en la Tabla VI.34.



**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.34.** Densidad, contenido de humedad y valores de densidad corregidos al 12% de humedad de las pequeñas probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> ) (CONTENIDO DE HUMEDAD (%))		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )
1B	604,42	(8,4)	615,30
1C	615,92	(8,5)	626,70
2A	611,67	(6,1)	629,71
2B	551,83	(8,9)	560,39
2C	701,50	(8,5)	713,78
3A	599,67	(8,4)	610,46
3B	681,42	(9,1)	691,30
3C	546,08	(9,1)	554,00
4A	597,25	(8,4)	608,00
4B	644,92	(9,0)	654,59
4C	553,08	(8,8)	561,93
5A	536,92	(9,0)	544,97
5B	595,83	(6,1)	613,41
5C	693,17	(7,6)	708,42
6A	781,75	(8,8)	794,26
6B	606,17	(8,6)	616,47
6C	641,50	(6,9)	657,86
7A	595,50	(6,3)	612,47
7B	577,50	(7,6)	590,21
7C	569,50	(8,7)	578,90
8A	566,50	(7,3)	579,81
8B	550,58	(8,9)	559,12
8C	586,25	(8,4)	596,80
9A	542,67	(8,4)	552,43
9B	535,00	(8,5)	544,36
9C	547,00	(9,0)	555,21
10A	590,42	(8,9)	599,57
10B	553,92	(8,7)	563,06
10C	605,67	(9,1)	614,45
11A	609,83	(8,6)	620,20
11B	551,42	(9,4)	558,59
11C	593,33	(9,1)	601,94
12A	555,17	(8,6)	564,60
12B	568,33	(8,9)	577,14
12C	596,58	(8,8)	606,13
13A	529,50	(9,5)	536,12
13B	577,58	(8,6)	587,40
13C	565,92	(8,9)	574,69
14A	717,42	(8,7)	729,25
14B	627,00	(8,9)	636,72
14C	747,17	(9,3)	757,25

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

Nº de probetas	Valor más alto	Densidad media (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad caract. (Kg/m <sup>3</sup> )
	Valor más bajo		
41	794,26	611,17	512,73
	536,12		

**VI.2.1.2.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos**

Para estudiar la relación entre las distintas velocidades de transmisión en función de la dirección de la fibra hemos realizado, para una misma probeta, medidas en el sentido longitudinal, perpendicular y tangencial a la fibra. Los resultados se recogen en las Tablas VI.35 y VI.36. Los valores aportados han sido corregidos y referidos a un contenido de humedad del 12% según las correlaciones obtenidas en capítulos anteriores.

**Tabla VI.35.** Velocidades de transmisión longitudinales,  $V_L$ , normales,  $V_N$ , y tangenciales a la fibra,  $V_T$ , referidas al 12% de humedad de las pequeñas probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	$V_{L12}$ (m/s)	$V_{N12}$ (m/s)	$V_{T12}$ (m/s)
1B	8,4	5357,22	2220,02	1587,53
1C	8,5	5589,01	2297,33	1924,58
2A	6,1	5126,43	1661,97	1540,24
2B	8,9	5189,67	2303,68	1538,04
2C	8,5	4979,10	2134,86	1796,24
3A	8,4	5099,71	1942,80	1548,64
3B	9,1	5296,07	1818,33	1778,74
3C	9,1	5196,35	2306,86	1723,83
4A	8,4	4941,34	2292,80	1532,20
4B	9,0	4482,08	2452,33	1738,04
4C	8,8	5140,15	1984,55	1651,28
5A	9,0	4832,09	2275,56	1740,95
5B	6,1	4661,55	2117,79	1399,76
5C	7,6	3897,10	2915,16	1834,85
6A	8,8	5105,63	2366,73	2320,29
6B	8,6	5554,62	2390,42	1859,02
6C	6,9	5089,54	2450,61	1753,82
7A	6,3	4731,75	2528,47	1735,51
7B	7,6	4923,86	1876,99	1447,33
7C	8,7	4826,55	2846,11	1816,72
8A	7,3	5469,64	1649,45	1685,32
8B	8,9	5363,60	2195,64	1617,41
8C	8,4	5402,21	2329,16	1692,80
9A	8,4	4697,77	2225,40	1622,80
9B	8,5	4717,30	2330,75	1531,69
9C	9,0	4760,39	1541,73	1721,56
10A	8,9	5161,84	2128,96	2019,71
10B	8,7	5321,99	2386,59	1947,56
10C	9,1	5086,79	2330,16	1680,54
11A	8,6	4755,06	2156,50	1895,13
11B	9,4	5025,74	2101,54	1701,11
11C	9,1	4563,58	2852,47	1858,68
12A	8,6	4778,91	2634,15	1927,96
12B	8,9	4953,42	1950,74	1870,38
12C	8,8	5023,66	2067,80	1629,15
13A	9,5	4138,52	1926,09	1245,19
13B	8,6	4132,14	2477,62	1797,83
13C	8,9	4386,88	2291,17	1820,66
14A	8,7	4011,03	2246,41	1874,17
14B	8,9	4605,82	2397,55	1316,86
14C	9,3	3792,88	2366,74	1623,76

Los valores estadísticos para el lote son los siguientes:

	$V_{L12}$ (m/s)	$V_{N12}$ (m/s)	$V_{T12}$ (m/s)
Nº de probetas	41		
Valor más bajo	3792,88	1541,73	1245,19
Valor más alto	5589,01	2915,16	2320,29
Valor medio	<b>4882,17</b>	<b>2238,29</b>	<b>1715,80</b>
Valor característico	4011,03	1611,97	1399,76

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.36.** Relación entre velocidades de transmisión de las pequeñas probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
1B	8,4	2,41	3,37	1,40
1C	8,5	2,43	2,90	1,19
2A	6,1	3,08	3,33	1,08
2B	8,9	2,25	3,37	1,50
2C	8,5	2,33	2,77	1,19
3A	8,4	2,62	3,29	1,25
3B	9,1	2,91	2,98	1,02
3C	9,1	2,25	3,01	1,34
4A	8,4	2,16	3,22	1,50
4B	9	1,83	2,58	1,41
4C	8,8	2,59	3,11	1,20
5A	9	2,12	2,78	1,31
5B	6,1	2,20	3,33	1,51
5C	7,6	1,34	2,12	1,59
6A	8,8	2,16	2,20	1,02
6B	8,6	2,32	2,99	1,29
6C	6,9	2,08	2,90	1,40
7A	6,3	1,87	2,73	1,46
7B	7,6	2,62	3,40	1,30
7C	8,7	1,70	2,66	1,57
8A	7,3	3,32	3,25	0,98
8B	8,9	2,44	3,32	1,36
8C	8,4	2,32	3,19	1,38
9A	8,4	2,11	2,89	1,37
9B	8,5	2,02	3,08	1,52
9C	9	3,09	2,77	0,90
10A	8,9	2,42	2,56	1,05
10B	8,7	2,23	2,73	1,23
10C	9,1	2,18	3,03	1,39
11A	8,6	2,20	2,51	1,14
11B	9,4	2,39	2,95	1,24
11C	9,1	1,60	2,46	1,53
12A	8,6	1,81	2,48	1,37
12B	8,9	2,54	2,65	1,04
12C	8,8	2,43	3,08	1,27
13A	9,5	2,15	3,32	1,55
13B	8,6	1,67	2,30	1,38
13C	8,9	1,91	2,41	1,26
14A	8,7	1,79	2,14	1,20
14B	8,9	1,92	3,50	1,82
14C	9,3	1,60	2,34	1,46

Los valores estadísticos para las relaciones entre velocidades:

	$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
<b>Nº de probetas</b>	41		
<b>Valor más bajo</b>	1,34	2,12	0,90
<b>Valor más alto</b>	3,32	3,50	1,82
<b>Valor medio</b>	<b>2,22</b>	<b>2,87</b>	<b>1,31</b>
<b>Desviación típica</b>	0,41	0,38	0,19

### Discusión de resultados y conclusiones:

Los resultados de los ensayos no destructivos sobre pequeñas probetas de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) permiten concluir:

1. Se confirma que, como se ha demostrado en los ensayos con probetas de tamaño estructural, la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es más densa, más pesada, que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Para las pequeñas probetas se obtiene una densidad media de 611,17 Kg/m<sup>3</sup>, similar a la densidad media obtenida para grandes probetas (623,96 Kg/m<sup>3</sup>), mientras que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) presenta una densidad media de 548,86 Kg/m<sup>3</sup>. Asimismo, la densidad característica es de 512,73 Kg/m<sup>3</sup> para pequeñas probetas y 564,28 Kg/m<sup>3</sup> para probetas estructurales, mientras que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) tiene un valor de densidad característica de 475,19 Kg/m<sup>3</sup>.
2. Los ensayos de ultrasonidos sobre pequeñas probetas arrojan unos valores de velocidad superiores a los valores obtenidos para las probetas de tamaño estructural. De esta forma queda demostrada la influencia de la separación entre transductores en la velocidad de ultrasonidos, deducida en el Capítulo VI.2.1.1.3. Asimismo, del análisis comparativo de las velocidades por especies se deduce, nuevamente, la similitud de los resultados y, por tanto, la imposibilidad de distinguir ambos tipos de madera en función a este parámetro. Los resultados obtenidos son:

Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arn.)	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)			
		LONGITUDINAL, V <sub>L</sub>	NORMAL, V <sub>N</sub>	TANGENCIAL, V <sub>T</sub>
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm)	4882,17	2238,29	1715,80
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm)	4559,16	1971,92	1547,67

Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	VELOCIDADES ULTRASONIDOS MEDIAS (m/s)			
		LONGITUDINAL, V <sub>L</sub>	NORMAL, V <sub>N</sub>	TANGENCIAL, V <sub>T</sub>
	Pequeñas probetas <sup>4</sup> (20 x 20 x 300 mm)	5338,73	2179,07	1525,35
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm)	4866,03	1838,96	1257,68

Las relaciones entre velocidades:

Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arn)		V <sub>L</sub> /V <sub>N</sub>	V <sub>L</sub> /V <sub>T</sub>	V <sub>N</sub> /V <sub>T</sub>
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm)	2,22	-	-
		-	2,87	-
		-	-	1,31
Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm)	2,34	-	-
		-	3,02	-
		-	-	1,29
		-	-	-

Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)		V <sub>L</sub> /V <sub>N</sub>	V <sub>L</sub> /V <sub>T</sub>	V <sub>N</sub> /V <sub>T</sub>
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm)	2,45	-	-
		-	3,5	-
		-	-	1,45
Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm)	2,69	-	-
		-	3,92	-
		-	-	1,46
		-	-	-

<sup>4</sup> Los valores de velocidad y las relaciones entre velocidades para pequeñas probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son obtenidos de trabajos precedentes del Grupo de Investigación (Rubio de Hita, 1997).

#### VI.2.1.2.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

En una segunda etapa se llevan a cabo los ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas de las probetas. Mediante los ensayos definidos en la norma UNE 56537:1979 se deducen el módulo de elasticidad global en flexión de una pieza ( $E_{m,g}$  o MOE) y su resistencia a flexión ( $f_m$  o MOR). En el capítulo VI.2. (Plan experimental) se describe detalladamente el procedimiento de estos ensayos.

##### **VI.2.1.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR)**

La resistencia a flexión ( $f_m$  o MOR) se calcula mediante la expresión:

$$f_m = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$f_m$	Resistencia a la flexión estática en N/mm <sup>2</sup> .
P	Carga de rotura a flexión registrada en el ensayo en newtons, N.
L	Longitud de la probeta entre apoyos en milímetros, mm. En este caso 240 mm.
B	Anchura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.
H	Altura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.

Este valor obtenido a partir de la rotura de pequeñas probetas debe corregirse para obtener el valor de resistencia real en piezas de tamaño estructural. La norma UNE 56537 define el factor de corrección **0,7161**, factor por el que debe multiplicarse la resistencia de ensayo para obtener el valor real.

##### **VI.2.1.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad longitudinal ( $E_L$ )**

El módulo de elasticidad longitudinal aparente viene dado por la siguiente expresión:

$$E_L = \frac{PL^3}{4fBH^3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$E_L$	Módulo de elasticidad longitudinal aparente en N/mm <sup>2</sup> .
P	Carga de rotura en newtons, N.
f	Deformación que produce la carga P antes del límite elástico en milímetros, mm.

Este módulo es corregido multiplicando por un factor de corrección de **1,1333** para tener en cuenta la influencia del esfuerzo cortante y obtener el módulo de elasticidad real  $E_L'$ .

A continuación se muestran los resultados para el lote completo de pequeñas probetas (Tabla VI.37). Asimismo, se detallan los resultados agrupando las probetas en 2 lotes: probetas limpias y con defectos de azulado (Tablas VI.38 y VI.39).

**Tabla VI.37.** Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

Nº PROBETA	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g} \text{ (real)}^5$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}^6$ (N/mm <sup>2</sup> )
1B	-- <sup>7</sup>	--	--	--
1C	--	--	125,10	89,58
2A	--	--	90,00	64,44
2B	5407,68	6128,52	79,20	56,71
2C	4753,39	5387,02	91,80	65,73
3A	4805,28	5445,83	90,90	65,09
3B	5400,00	6119,82	115,20	82,49
3C	4767,89	5403,45	89,10	63,80
4A	4907,09	5561,21	100,80	72,18
4B	4957,71	5618,57	108,45	77,66
4C	--	--	--	--
5A	4792,50	5431,34	63,90	45,75
5B	5294,36	6000,09	95,85	68,63
5C	3980,57	4511,18	58,05	41,56
6A	8121,37	9203,95	128,25	91,83
6B	4674,88	5298,04	123,30	88,29
6C	4949,60	5609,38	117,45	84,10
7A	4688,96	5314,00	109,80	78,62
7B	3924,11	4447,20	101,70	72,82
7C	4733,14	5364,07	106,20	76,04
8A	--	--	--	--
8B	3406,82	3860,95	87,30	62,51
8C	2875,41	3258,70	94,05	67,34
9A	--	--	46,80	33,51
9B	4176,22	4732,91	54,90	39,31
9C	3831,57	4342,32	81,90	58,64
10A	--	--	93,15	66,70
10B	5540,86	6279,46	79,65	57,03
10C	2145,14	2431,09	58,50	41,89
11A	4870,14	5519,33	97,20	69,60
11B	3292,46	3731,34	81,90	58,64
11C	4602,82	5216,38	74,70	53,49
12A	1646,63	1866,13	22,95	16,43
12B	3112,50	3527,39	37,35	26,74
12C	3548,67	4021,71	108,90	77,98
13A	3309,31	3750,44	66,60	47,69
13B	3688,42	4180,08	65,70	47,04
13C	3158,49	3579,51	69,75	49,94
14A	4713,81	5342,16	106,65	76,37
14B	4891,18	5543,18	67,05	48,01
14C	--	--	--	--

<sup>5</sup> El módulo de elasticidad es corregido con un factor de corrección de **1,1333** para tener en cuenta la influencia del esfuerzo cortante y obtener el módulo de elasticidad real  $E_L'$ .

<sup>6</sup> Corrección de dimensiones de la probeta. Según la norma UNE 56537 la resistencia a flexión de probetas de 20x20x300 mm debe multiplicarse por el factor **0,7161**.

<sup>7</sup> Los datos de ensayo de estas probetas no pudieron ser recogidos.

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.38.** Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas sin azulado de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

N° PROBETA	E <sub>m,g</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>m,g (real)</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m,HR</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
1C	--	--	125,10	89,58
2A	--	--	90,00	64,44
2B	5407,68	6128,52	79,20	56,71
3C	4767,89	5403,45	89,10	63,80
4A	4907,09	5561,21	100,80	72,18
4B	4957,71	5618,57	108,45	77,66
5B	5294,36	6000,09	95,85	68,63
5C	3980,57	4511,18	58,05	41,56
6A	8121,37	9203,95	128,25	91,83
6B	4674,88	5298,04	123,30	88,29
6C	4949,60	5609,38	117,45	84,10
7A	4688,96	5314,00	109,80	78,62
7B	3924,11	4447,20	101,70	72,82
7C	4733,14	5364,07	106,20	76,04
8B	3406,82	3860,95	87,30	62,51
10A	--	--	93,15	66,70
10B	5540,86	6279,46	79,65	57,03
11A	4870,14	5519,33	97,20	69,60
11C	4602,82	5216,38	74,70	53,49
13B	3688,42	4180,08	65,70	47,04
14A	4713,81	5342,16	106,65	76,37
14B	4891,18	5543,18	67,05	48,01

**Tabla VI.39.** Módulo de elasticidad y resistencia a flexión de las pequeñas probetas con azulado de madera nueva: especie *Pinus Nigra* Arnold.

N° PROBETA	E <sub>m,g</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>m,g (real)</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m,HR</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
2C	4753,39	5387,02	91,80	65,73
3A	4805,28	5445,83	90,90	65,09
3B	5400,00	6119,82	115,20	82,49
5A	4792,50	5431,34	63,90	45,75
8C	2875,41	3258,70	94,05	67,34
9A	--	--	46,80	33,51
9B	4176,22	4732,91	54,90	39,31
9C	3831,57	4342,32	81,90	58,64
10C	2145,14	2431,09	58,50	41,89
11B	3292,46	3731,34	81,90	58,64
12A	1646,63	1866,13	22,95	16,43
12B	3112,50	3527,39	37,35	26,74
12C	3548,67	4021,71	108,90	77,98
13A	3309,31	3750,44	66,60	47,69
13C	3158,49	3579,51	69,75	49,94

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### ■ Valores estadísticos globales:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g} \text{ (real)}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	1646,63	1866,13	22,95	16,43
Valor más alto	8121,37	9203,95	128,25	91,83
Valor medio	4332,39	4909,90	86,21	61,73
5° percentil	2583,30	2927,65	44,91	32,15
DesVI. típica	1151,19	1304,65	24,60	17,617

### ■ Valores estadísticos según calidad visual del lote:

Los valores estadísticos para el lote de madera sin azulado son los siguientes:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g} \text{ (real)}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	3406,82	3860,95	58,05	41,56
Valor más alto	8121,37	9203,95	128,25	91,83
Valor medio	4848,49	5494,80	95,66	68,50
5° percentil	3660,26	4148,16	65,76	47,08
DesVI. típica	943,57	1069,35	19,16	13,72

Los valores estadísticos para el lote de madera con azulado son los siguientes:

	$E_{m,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{m,g} \text{ (real)}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{m,HR}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor más bajo	1646,63	1866,13	22,95	16,43
Valor más alto	5400	6119,82	115,20	82,49
Valor medio	3631,96	4116,11	72,36	51,81
5° percentil	1970,66	2233,35	33,03	23,64
Desv. típica	1031,22	1168,69	25,13	17,99



### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Según los resultados estadísticos de los ensayos mecánicos del lote completo de probetas (madera con y sin azulado) es posible asignar un valor medio de resistencia a flexión de 61,73 N/mm<sup>2</sup> y un valor característico de 32,15 N/mm<sup>2</sup>. Asimismo, el valor medio del módulo de elasticidad es 4909,90 N/mm<sup>2</sup> mientras que el valor característico es de 2927,65 N/mm<sup>2</sup>.
2. Es necesario apuntar que, aunque la actual norma de clasificación visual no considera el azulado un defecto excluyente, se han extraído diferencias significativas entre los resultados estadísticos de los ensayos mecánicos de los lotes de madera con y sin azulado:
  - a. Para el lote de madera sin azulado se obtiene un valor medio de resistencia a flexión de 68,50 N/mm<sup>2</sup> y un valor característico de 47,08 N/mm<sup>2</sup>. Estos resultados coinciden con los resultados extraídos para el lote de madera estructural de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Para este lote compuesto de probetas sin defectos y sin azulado se obtuvieron un valor medio de resistencia a flexión de 61,68 N/mm<sup>2</sup> y un valor característico de 46,80 N/mm<sup>2</sup>. Estos resultados reflejan, además, la concordancia entre los factores de corrección por tamaño de probeta aportados por ambas normas, UNE 56537 y UNE 384.<sup>8</sup>
  - b. Para el lote de madera con azulado se obtiene un valor medio de resistencia a flexión de 51,81 N/mm<sup>2</sup> y una resistencia característica de 23,64 N/mm<sup>2</sup>.

---

<sup>8</sup> Los valores del módulo de elasticidad entre ambos lotes (pequeñas probetas y probetas estructurales) no son comparables dado que la configuración de los ensayos arroja resultados distintos.

### VI.2.1.2.3. CORRELACIONES DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

En este apartado se estudian las relaciones que existen entre los resultados de los ensayos no destructivos, propiedades físicas, clasificación visual y velocidades de ultrasonidos, y los parámetros resistentes, módulo de elasticidad y resistencia a flexión, obtenidos de los ensayos destructivos.

Estas correlaciones han sido obtenidas para el lote de pequeñas probetas de madera nueva de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) sin azulado. Se ha considerado correcto realizar esta discriminación para poder comparar, en una segunda fase, estos resultados con las correlaciones que fueron obtenidas para el lote de pequeñas probetas de madera nueva de la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) en trabajos precedentes de este grupo de investigación. De este modo, se pretende comprobar si existen diferencias significativas en los valores resistentes obtenidos a partir de las correlaciones para ambas especies y comprobar qué correlaciones ofrecen unos resultados más conservadores. Las conclusiones obtenidas serán comparadas con los resultados extraídos en capítulos anteriores para los lotes de probetas de tamaño estructural de ambas especies.

Siguiendo estos criterios, se obtienen:

- Relación entre la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad estático.
- Relación entre la velocidad longitudinal y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión.
- Relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático.

#### **VI.2.1.2.3.1. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y la resistencia a flexión (MOR)**

- Pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

$$MOR = 0,0156 V_L - 9,9562 \quad R^2 = 0,2626$$

- Pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)<sup>9</sup>

$$MOR = 0,0124 V_L - 5,336 \quad R^2 = 0,66$$

#### **VI.2.1.2.3.2. Relación entre la velocidad longitudinal ( $V_L$ ) y el módulo de elasticidad estático (MOE)**

- Pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

$$MOE = 0,6943 V_L + 2134,5 \quad R^2 = 0,3864$$

- Pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)<sup>9</sup>

$$MOE = 1,02 V_L - 947,9 \quad R^2 = 0,343$$

#### **VI.2.1.2.3.3. Relación entre el módulo de elasticidad estático (MOE) y la resistencia a flexión (MOR)**

- Pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

$$MOR = 0,0188 MOE - 34,031 \quad R^2 = 0,4174$$

#### **VI.2.1.2.3.4. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión (MOR)**

- Pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

$$MOR = 0,004 E_d + 9,8884 \quad R^2 = 0,5289$$

#### **VI.2.1.2.3.5. Relación entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (MOE)**

- Pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)

$$MOE = 0,38 E_d + 355,35 \quad R^2 = 0,7137$$

- Pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)<sup>9</sup>

$$MOE = 0,16 E_d + 2116,2 \quad R^2 = 0,6$$

<sup>9</sup> Las correlaciones para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son extraídas de trabajos precedentes del Grupo de Investigación (tesis doctoral Rubio de Hita, 1997)

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se han obtenido las correlaciones necesarias para obtener, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos ( $V_L$ ) y la densidad ( $d$ ), los parámetros resistentes (MOR, MOE) de la madera sana de calidad ME-1 de la especie pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*) a partir del ensayo con pequeñas probetas:

<b>MOR = 0,0156 <math>V_L</math> - 9,9562</b>	<b><math>R^2 = 0,2626</math></b>
<b>MOE = 0,6943 <math>V_L</math> + 2134,5</b>	<b><math>R^2 = 0,3864</math></b>
<b>MOR = 0,0188 MOE - 34,031</b>	<b><math>R^2 = 0,4174</math></b>
<b>MOR = 0,004 <math>E_d</math> + 9,8884</b>	<b><math>R^2 = 0,5289</math></b>
<b>MOE = 0,38 <math>E_d</math> + 355,35</b>	<b><math>R^2 = 0,7137</math></b>

2. Asimismo, para la madera sana de pino silvestre (*Pinus Sylvestris L*) de calidad ME-1 se han obtenido las siguientes correlaciones:

<b>MOR = 0,0124 <math>V_L</math> - 5,336</b>	<b><math>R^2 = 0,66</math></b>
<b>MOE = 1,02 <math>V_L</math> - 947,9</b>	<b><math>R^2 = 0,343</math></b>
<b>MOE = 0,16 <math>E_d</math> + 2116,2</b>	<b><math>R^2 = 0,6</math></b>

3. Como ha resultado de los ensayos con probetas estructurales, en las correlaciones obtenidas con pequeñas probetas para ambas especies se observa que, de modo general, al introducir la variable de la densidad a partir del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d = V_L^2 \cdot d$ ), las correlaciones mejoran considerablemente. Esto significa que la densidad es de suma importancia para obtener unas correlaciones fiables. De esta forma coincidimos con las conclusiones obtenidas por otros autores (chesnut) para otros parámetros resistentes (resistencia a compresión) de otras especies de madera (castaño).
4. Al obtener los parámetros resistentes dando valores a las ecuaciones matemáticas aportadas para ambas especies obtenemos que:

- Para una velocidad longitudinal de 4000 m/s se obtienen unos valores:

Pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*):

MOR: 52,45 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 4911,7 N/mm<sup>2</sup>

Pino silvestre (*Pinus Sylvestris L*):

MOR: 44,264 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 3132,1 N/mm<sup>2</sup>

- Para una velocidad longitudinal de 5000 m/s se obtienen unos valores:

Pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*):

MOR: 68,05 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 5606 N/mm<sup>2</sup>

Pino silvestre (*Pinus Sylvestris L*):

MOR: 56,66 N/mm<sup>2</sup>  
MOE: 4152,1 N/mm<sup>2</sup>

Estos resultados demuestran que, para estos supuestos, las ecuaciones obtenidas para cada especie arrojan unos valores sobre las características mecánicas estudiadas muy dispares. De ello se deriva que las correlaciones para ambas especies no pueden usarse indistintamente ya que la madera de pino laricio (*Pinus Nigra Arnold*) es más resistente que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris L*). De este modo, si no es posible hacer una identificación morfológica de la especie se aplicarán las correlaciones obtenidas para la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris L*) encontrándonos de este modo del lado de la seguridad.

## VI.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

Los ensayos sobre madera deteriorada se han realizado sobre pequeñas probetas (20x20x300 mm) talladas a partir de vigas de madera de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) procedentes de derribo. La imposibilidad de encontrar piezas de gran escuadría con patrones de deterioro uniformes nos lleva a emplear, en este capítulo, pequeñas probetas para, en una segunda fase, correlacionar los resultados obtenidos en los distintos estadios de deterioro con la resistencia residual de las piezas.

### VI.2.2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

A continuación se exponen los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos:

- Determinación de las propiedades físicas de las probetas (pérdida de densidad y contenido de humedad).
- Medición de la velocidad de transmisión de ultrasonidos perpendicular a la fibra (velocidad normal).

#### VI.2.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas

*Humedad:*

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002.

*Pérdida de densidad:*

Para determinar las pérdidas de densidad de las probetas deterioradas se han comparado cuantitativamente sus valores de densidad con los valores de densidad de las probetas sanas extraídas de la misma viga.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la Tabla VI.40. Los valores de densidad están corregidos para un contenido de humedad del 12%.

**Tabla VI.40.:** Pérdidas de densidad referidas al 12% de humedad de las probetas de madera deteriorada.

Nº PROBETA	MASA (g)	DENSIDAD 12% (Kg/m³)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)
1 <sub>A</sub> (sana)	74,61	62,18	--
1 <sub>B</sub> (sana)	75,25	62,71	--
1 <sub>C</sub> (sana)	74,47	62,06	--
1 <sub>D</sub> (sana)	71,1	59,25	--
1 <sub>E</sub>	72,55	60,46	1,77
1 <sub>F</sub>	61,72	51,43	16,43
1 <sub>G</sub>	56,96	47,47	22,87
2 <sub>A</sub> (sana)	75,87	63,23	--
2 <sub>H</sub> (sana)	77,37	64,48	--
2 <sub>B</sub>	76,23	63,53	0,50
2 <sub>C</sub>	65,79	54,83	14,13
2 <sub>D</sub>	63,93	53,28	16,56
2 <sub>E</sub>	61,66	51,38	19,52
2 <sub>F</sub>	61,66	51,38	19,52
2 <sub>G</sub>	63,66	53,05	16,91
3 <sub>A</sub> (sana)	57,02	47,52	--
3 <sub>B</sub> (sana)	57,43	47,86	--
3 <sub>C</sub> (sana)	55,07	45,89	--
3 <sub>D</sub>	49,33	41,11	12,70
3 <sub>E</sub>	49,33	41,11	12,70
3 <sub>F</sub>	49,05	40,88	13,19
3 <sub>G</sub>	48,32	40,27	14,48
3 <sub>H</sub>	47,83	39,86	15,35
3 <sub>I</sub>	45,36	37,80	19,72
4 <sub>A</sub> (sana)	56,26	46,88	--
4 <sub>B</sub> (sana)	61,37	51,14	--
4 <sub>C</sub> (sana)	53,8	44,83	--
4 <sub>D</sub>	55,64	46,37	2,63
4 <sub>E</sub>	56,8	47,33	0,60
4 <sub>F</sub>	44,67	37,23	21,82
5 <sub>A</sub> (sana)	69,29	57,74	--
5 <sub>B</sub> (sana)	71,94	59,95	--
5 <sub>C</sub>	67,91	56,59	3,83
5 <sub>D</sub>	67,28	56,07	4,72
5 <sub>E</sub>	67,17	55,98	4,87
5 <sub>F</sub>	56,58	47,15	19,87
5 <sub>G</sub>	49,31	41,09	30,17
5 <sub>H</sub>	54,69	45,58	22,55
6 <sub>A</sub> (sana)	78,13	65,11	--
6 <sub>B</sub> (sana)	71,01	59,18	--
6 <sub>C</sub>	69,47	57,89	6,83
6 <sub>D</sub>	72,11	60,09	3,29
6 <sub>E</sub>	72,02	60,02	3,41
6 <sub>F</sub>	62,41	52,01	16,30
6 <sub>G</sub>	68,62	57,18	7,97
6 <sub>H</sub>	63,72	53,10	14,55
6 <sub>I</sub>	63,07	52,56	15,42

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

<b>7<sub>A</sub> (sana)</b>	71,23	59,36	--
<b>7<sub>B</sub> (sana)</b>	69,54	57,95	--
<b>7<sub>C</sub> (sana)</b>	74,59	62,16	--
<b>7<sub>D</sub></b>	61,72	51,43	14,02
<b>7<sub>E</sub></b>	59,21	49,34	17,51
<b>7<sub>F</sub></b>	58,24	48,53	18,87
<b>7<sub>G</sub></b>	57,6	48,00	19,76
<b>7<sub>H</sub></b>	58,85	49,04	18,02
<b>7<sub>I</sub></b>	55,58	46,32	22,57
<b>8<sub>A</sub> (sana)</b>	51,3	42,75	--
<b>8<sub>B</sub> (sana)</b>	53,31	44,43	--
<b>8<sub>C</sub> (sana)</b>	51,96	43,30	--
<b>8<sub>D</sub> (sana)</b>	64,7	53,92	--
<b>8<sub>E</sub> (sana)</b>	52,99	44,16	--
<b>8<sub>F</sub> (sana)</b>	61,63	51,36	--
<b>8<sub>G</sub></b>	46,89	39,08	10,15
<b>8<sub>H</sub></b>	49,11	40,93	5,90
<b>8<sub>I</sub></b>	38,08	31,73	27,03
<b>8<sub>J</sub></b>	43,59	36,33	16,47
<b>8<sub>K</sub></b>	32,9	27,42	36,96
<b>8<sub>L</sub></b>	34,79	28,99	33,33
<b>9<sub>A</sub> (sana)</b>	70,85	59,04	--
<b>9<sub>B</sub> (sana)</b>	72,64	60,53	--
<b>9<sub>C</sub> (sana)</b>	72,92	60,77	--
<b>9<sub>D</sub></b>	64,83	54,03	10,12
<b>9<sub>E</sub></b>	62,47	52,06	13,40
<b>9<sub>F</sub></b>	70,73	58,94	1,95
<b>9<sub>G</sub></b>	65,48	54,57	9,22
<b>9<sub>H</sub></b>	66,23	55,19	8,18
<b>10<sub>A</sub> (sana)</b>	58	48,33	--
<b>10<sub>B</sub> (sana)</b>	57,97	48,31	--
<b>10<sub>C</sub> (sana)</b>	58,6	48,83	--
<b>10<sub>D</sub></b>	54,15	45,13	6,94
<b>10<sub>E</sub></b>	56,11	46,76	3,57
<b>10<sub>F</sub></b>	55,15	45,96	5,22

Los valores estadísticos globales para el lote son los siguientes:

<b>PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)</b>	<b>Nº DE PROBETAS</b>
<b>Madera sana (0%)</b>	31
<b>0-10 %</b>	18
<b>10-20 %</b>	25
<b>20-30 %</b>	5
<b>30-40 %</b>	3
<b>Probetas totales</b>	82

**VI.2.2.1.2. Medición de las velocidades de ultrasonidos**

A partir de la metodología de ultrasonidos, la forma de medición más eficaz para detectar el deterioro de un elemento de madera es a través de las velocidades de transmisión perpendiculares a la fibra (velocidades normales). Las velocidades de ultrasonidos longitudinales (paralelas a la fibra) han resultado ineficaces para detectar pérdidas de densidad en un elemento de madera (Rubio de Hita, 1997).

Asimismo, como ha quedado demostrado en el Capítulo VI.2.1.1.2, la medición de las velocidades perpendiculares a la fibra están influenciadas por, entre otros factores, la distancia entre los transductores. Este factor influye significativamente en piezas con escuadrías inferiores a 45 mm. En el caso que nos ocupa, piezas con una sección transversal de 20x20 mm, es necesario corregir esta desviación aplicando la ecuación establecida, a partir de la cual obtendremos la velocidad normal corregida. Con este nuevo parámetro es posible extrapolar los resultados obtenidos con pequeñas probetas a vigas reales.

A continuación se muestra la Tabla VI.41 en la que se detallan las velocidades normales (in situ y corregidas) en función de la pérdida de densidad de las probetas.

**Tabla VI.41.:** Velocidades normales en función de las pérdidas de densidad de las probetas de madera deteriorada.

Nº PROBETA	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL (m/s)	VELOCIDAD NORMAL CORREGIDA <sup>10</sup> (m/s)
1 A (sana)	--	2193,27	1555,81
1 B (sana)	--	2116,50	1466,17
1 C (sana)	--	2500	1811,08
1 D (sana)	--	2500	1746,77
1 E	1,77	1680,78	798,19
1 F	16,43	1611,91	994,30
1 G	22,87	1485,47	969,68
2 A (sana)	--	2136,69	1422,06
2 H (sana)	--	2076,77	1387,86
2 B	0,50	1883,42	1143,06
2 C	14,13	2092,78	1020,30
2 D	16,56	1800,13	715,24
2 E	19,52	1968,10	951,13
2 F	19,52	1205,54	469,84
2 G	16,91	1041,66	1330,10
3 A (sana)	--	1996,02	1242,80
3 B (sana)	--	1925,92	1172,70
3 C (sana)	--	2211,63	1458,40
3 D	12,70	1941,93	1188,70
3 E	12,70	1790,85	945,72
3 F	13,19	1474,06	869,26
3 G	14,48	1431,20	529,63
3 H	15,35	1401,68	544,96
3 I	19,72	1678,68	792,40
4 A (sana)	--	2310,61	1608,83
4 B (sana)	--	2139,14	1437,37
4 C (sana)	--	2396,09	1720,04
4 D	2,63	1971,70	1282,79
4 E	0,60	1907,76	804,09
4 F	21,82	1567,46	801,72

<sup>10</sup> Velocidad normal corregida en función del tamaño de la probeta (Capítulo VI.2.1.1.2) y su humedad.



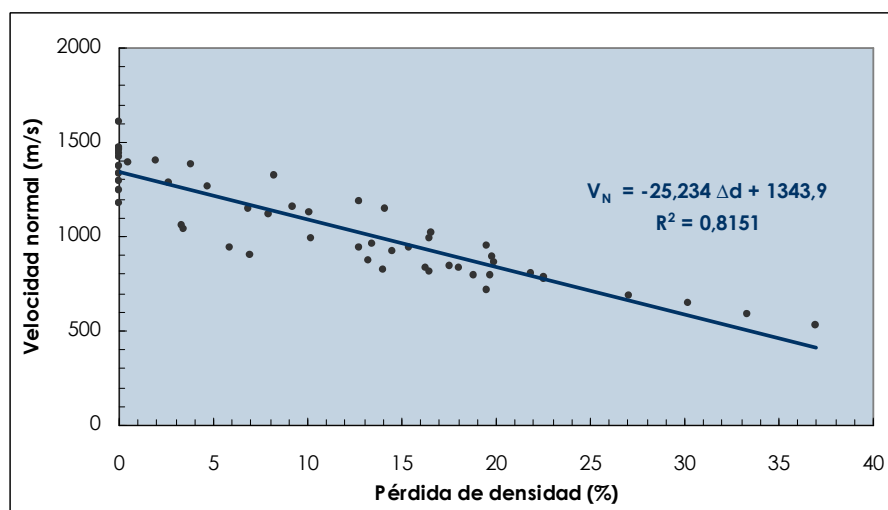
ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL

<b>5 A (sana)</b>	--	2127,45	1464,26
<b>5 B (sana)</b>	--	2315,78	1665,46
<b>5 C</b>	3,83	2033,80	1383,48
<b>5 D</b>	4,72	2095,42	1267,99
<b>5 E</b>	4,87	1625	706,11
<b>5 F</b>	19,87	1563,72	861,95
<b>5 G</b>	30,17	1324,77	644,16
<b>5 H</b>	22,55	1157,72	778,33
<b>6 A (sana)</b>	--	2321,40	1632,49
<b>6 B (sana)</b>	--	1908,06	1180,56
<b>6 C</b>	6,83	2016,12	1145,68
<b>6 D</b>	3,29	2085,35	1061,88
<b>6 E</b>	3,41	2068,49	1035,70
<b>6 F</b>	16,30	2056,25	832,79
<b>6 G</b>	7,97	1941,92	1117,72
<b>6 H</b>	14,55	1746,87	919,89
<b>6 I</b>	15,42	1812,65	938,00
<b>7 A (sana)</b>	--	2181,88	1467,24
<b>7 B (sana)</b>	--	1746,03	1044,25
<b>7 C (sana)</b>	--	2321,07	1593,58
<b>7 D</b>	14,02	1901,42	824,12
<b>7 E</b>	17,51	1845,01	845,34
<b>7 F</b>	18,87	1800,64	793,91
<b>7 G</b>	19,76	1789,77	890,02
<b>7 H</b>	18,02	1705,12	828,94
<b>7 I</b>	22,57	1583,93	783,66
<b>8 A (sana)</b>	--	2401,99	1687,36
<b>8 B (sana)</b>	--	2460,12	1784,08
<b>8 C (sana)</b>	--	2638,73	1949,82
<b>8 D (sana)</b>	--	1868,88	1179,97
<b>8 E (sana)</b>	--	1878,78	1202,74
<b>8 F (sana)</b>	--	1840	1163,95
<b>8 G</b>	10,15	1581,50	994,97
<b>8 H</b>	5,90	1682,88	941,52
<b>8 I</b>	27,03	1420,61	690,16
<b>8 J</b>	16,47	1494,51	815,17
<b>8 K</b>	36,96	1090,54	527,92
<b>8 L</b>	33,33	1202,50	587,70
<b>9 A (sana)</b>	--	2203,34	1514,43
<b>9 B (sana)</b>	--	1037,73	1373,69
<b>9 C (sana)</b>	--	1282,05	1810,87
<b>9 D</b>	10,12	2071,51	1123,92
<b>9 E</b>	13,40	1803,60	958,72
<b>9 F</b>	1,95	2102,55	1399,86
<b>9 G</b>	9,22	2060,01	1152,01
<b>9 H</b>	8,18	2367,02	1319,85
<b>10 A (sana)</b>	--	2019,97	1292,47
<b>10 B (sana)</b>	--	1803,06	1075,57
<b>10 C (sana)</b>	--	1857,36	1155,59
<b>10 D</b>	6,94	1577,19	901,14
<b>10 E</b>	3,57	1403,22	740,03
<b>10 F</b>	5,22	1378,01	727,69

### VI.2.2.1.3. Relación de la pérdida de densidad con la velocidad normal

Uno de los objetivos del presente trabajo de investigación es poder determinar, en función de las medidas de velocidad de ultrasonidos, el estado de conservación y/o deterioro de una pieza de madera. Así, aunque en las Tablas VI.43. y VI.44 se han recogido los datos estadísticos que permiten establecer dichas correlaciones, la mejor manera de ilustrar este fenómeno es su representación gráfica.

A continuación, se muestra la Figura VI.71 en la que se relaciona la pérdida de densidad de la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) con su velocidad normal corregida.



**Figura VI.71.** Relación entre la pérdida de densidad y la velocidad normal de ultrasonidos para madera deteriorada de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
82	$V_N = -25,234 \Delta d + 1343,9$	$1,05 \cdot 10^{-20}$	0,8151

De forma análoga, es posible conocer la pérdida de densidad ( $\Delta d$ ) de un elemento a partir de su velocidad perpendicular de ultrasonidos, ( $V_N$ ) mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N$$

siendo,

$\Delta d$  Pérdida de densidad (%).

$V_N$  Velocidad de ultrasonidos perpendicular a la fibra en m/s.

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación directa entre la pérdida de densidad de una sección de un elemento de madera y su velocidad normal de ultrasonidos. Con estos resultados se confirman las conclusiones de otros autores (Mishiro, 1996 y Rubio de Hita, 1997) en cuyos estudios demuestran que existe una relación entre la densidad de la madera y los valores de velocidad de ultrasonidos perpendicular o tangencial a la fibra.
2. Para determinar la pérdida de densidad de un elemento de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se propone la siguiente ecuación:

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N \quad R^2 = 0,8151$$

siendo;

$V_N$  velocidad normal (m/s) del elemento estudiado.

$\Delta d$  pérdida de densidad (%) de dicho elemento.

3. Mediante la velocidad normal de ultrasonidos y la ecuación de regresión establecida es posible conocer el estado de conservación y/o diagnóstico de una estructura de madera. De este modo se fijan tres intervalos de diagnóstico en función de la velocidad normal de ultrasonidos de un elemento:

- $V_N > 1200$  m/s  $\rightarrow$  Madera sana.
- $1200$  m/s  $> V_N > 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera con inicio de deterioro. Pérdida de densidad entre 0-30%.
- $V_N < 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$ .

Además de estos intervalos absolutos deben establecerse unos intervalos de diagnóstico relativos. Existen maderas cuyos valores de velocidad normal son muy elevados, superiores a 2500 m/s. En estos casos, es posible encontrar elementos de madera muy deteriorados que, sin embargo, alcancen unas velocidades normales superiores a 1200 m/s. Esta casuística nos lleva a plantear un criterio complementario para diagnosticar el estado de conservación de una estructura atendiendo a una bajada de velocidad normal relativa a un valor de referencia de madera sana de acuerdo al siguiente criterio:

- Bajada de  $V_N$ : **0%**  $\rightarrow$  Madera sana.
- Bajada de  $V_N$ : **0% - 50%**  $\rightarrow$  Madera con inicio de deterioro. Pérdida de densidad entre 0-30%).
- Bajada de  $V_N$ :  **$> 50\%$**   $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$ .

Con todo ello debe concluirse que para establecer el diagnóstico de una estructura debe atenderse a un doble criterio:

- **Intervalos absolutos** de velocidades normales.
- **Intervalos relativos** de bajadas de velocidad normal.

### VI.2.2.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

En una segunda etapa se llevan a cabo los ensayos destructivos para determinar las propiedades mecánicas de las probetas. Dado que en este capítulo trabajamos con pequeñas probetas 20x20x300 mm se aplica la norma UNE 56537:1979 cuya metodología de ensayo consiste en aplicar una carga puntual en el centro de la pieza. Como datos resultantes se obtienen la carga de rotura de la pieza y la flecha que permiten determinar la resistencia a flexión estática ( $f_m$  o MOR) y el módulo de elasticidad longitudinal aparente ( $E_{m,g}$  o MOE).

#### VI.2.2.2.1. Determinación de la resistencia a flexión ( $f_m$ o MOR)

La resistencia a flexión ( $f_m$  o MOR) se calcula mediante la expresión:

$$f_m = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$f_m$	Resistencia a la flexión estática en N/mm <sup>2</sup> .
P	Carga de rotura en newtons, N.
L	Longitud de la probeta entre apoyos en milímetros, mm. En este caso 240 mm.
B	Anchura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.
H	Altura de la probeta en milímetros, mm. En este caso 20 mm.

Este valor obtenido a partir de la rotura de pequeñas probetas debe corregirse para obtener el valor de resistencia real en piezas de tamaño estructural. La norma UNE 56537:1979 define el factor de corrección **0,7161**, factor por el que debe multiplicarse la resistencia de ensayo para obtener el valor real.

#### VI.2.2.2.2. Determinación del módulo de elasticidad longitudinal ( $E_L$ )

El módulo de elasticidad longitudinal aparente viene dado por la siguiente expresión:

$$E_L = \frac{PL^3}{4fBH^3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

$E_L$	Módulo de elasticidad longitudinal en N/mm <sup>2</sup> .
P	Carga de rotura en newtons, N.
f	Deformación que produce la carga P antes del límite elástico en milímetros, mm.

Este módulo es corregido multiplicando por un factor de corrección de **1,1333** para tener en cuenta la influencia del esfuerzo cortante y obtener el módulo de elasticidad real  $E_L'$ .

A continuación se muestran los resultados en la Tabla VI.42.

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* ARNOLD).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

**Tabla VI.42.** Resistencia a flexión y módulo de elasticidad real de las probetas de madera deteriorada.

Nº PROBETA	CARGA DE ROTURA (N)	FLECHA (mm)	f <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>m,HR</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>l'</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
1 <sub>A</sub> (sana)	2520	9,6	113,4	81,20	6425,81
1 <sub>B</sub> (sana)	2440	8,09	109,8	78,62	7383,12
1 <sub>C</sub> (sana)	2170	7,22	97,65	69,92	7357,34
1 <sub>D</sub> (sana)	2410	9,36	108,45	77,66	6302,89
1 <sub>E</sub>	2130	10,21	95,85	68,63	5106,84
1 <sub>F</sub>	1680	8,51	75,6	54,13	4832,57
1 <sub>G</sub>	1130	9,82	50,85	36,41	2816,86
2 <sub>A</sub> (sana)	1770	8,35	79,65	57,03	5189,01
2 <sub>H</sub> (sana)	1420	6,15	63,9	45,75	5652,12
2 <sub>B</sub>	900	5,13	40,5	29,00	4294,60
2 <sub>C</sub>	1450	8,07	65,25	46,72	4398,38
2 <sub>D</sub>	1010	9,98	45,45	32,54	2477,35
2 <sub>E</sub>	990	6,61	44,55	31,90	3666,33
2 <sub>F</sub>	--	--	--	--	--
2 <sub>G</sub>	1690	7,87	76,05	54,45	5256,66
3 <sub>A</sub> (sana)	1830	7,58	82,35	58,97	5909,91
3 <sub>B</sub> (sana)	1680	7,65	75,6	54,13	5375,84
3 <sub>C</sub> (sana)	1630	7,02	73,35	52,52	5683,93
3 <sub>D</sub>	1450	8,09	65,25	46,72	4387,51
3 <sub>E</sub>	1400	8,96	63	45,11	3824,88
3 <sub>F</sub>	1350	7,65	60,75	43,50	4319,86
3 <sub>G</sub>	1050	8,78	47,25	33,83	2927,47
3 <sub>H</sub>	1240	9,79	55,8	39,95	3100,53
3 <sub>I</sub>	650	5,87	29,25	20,94	2710,64
4 <sub>A</sub> (sana)	1440	10,11	64,8	46,40	2714,69
4 <sub>B</sub> (sana)	1600	10,68	72	51,55	2855,34
4 <sub>C</sub> (sana)	940	6,95	42,3	30,29	2577,81
4 <sub>D</sub>	1340	10,04	60,3	43,18	2543,78
4 <sub>E</sub>	1470	9,13	66,15	47,37	3068,71
4 <sub>F</sub>	350	4,08	15,75	11,27	1634,99
5 <sub>A</sub> (sana)	1720	7,98	77,4	55,42	4108,03
5 <sub>B</sub> (sana)	1650	7,13	74,25	53,17	4410,65
5 <sub>C</sub>	2030	9,69	91,35	65,41	3245,16
5 <sub>D</sub>	2050	12,04	92,25	66,06	3245,06
5 <sub>E</sub>	1890	9,23	85,05	60,90	3902,73
5 <sub>F</sub>	710	9,78	31,95	22,87	1383,66
5 <sub>G</sub>	240	4,41	10,8	7,73	1037,24
5 <sub>H</sub>	640	7,21	28,8	20,62	1691,82
6 <sub>A</sub> (sana)	1360	5,59	61,2	43,82	4636,98
6 <sub>B</sub> (sana)	1040	7,59	46,8	33,51	2611,56
6 <sub>C</sub>	1380	7,61	62,1	44,46	3456,23
6 <sub>D</sub>	1230	5,01	55,35	39,63	4679,24
6 <sub>E</sub>	1020	5,72	45,9	32,86	3398,70
6 <sub>F</sub>	580	5,68	26,1	18,69	1946,20
6 <sub>G</sub>	720	5,93	32,4	23,20	2314,13
6 <sub>H</sub>	960	8	43,2	30,93	2287,12
6 <sub>I</sub>	740	4,43	33,3	23,84	3183,73

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

<b>7 A (sana)</b>	2160	11,72	97,2	69,60	3512,65
<b>7 B (sana)</b>	2070	8,63	93,15	66,70	4571,60
<b>7 C (sana)</b>	1920	8,01	86,4	61,87	4568,54
<b>7 D</b>	1590	10,2	71,55	51,23	2971,02
<b>7 E</b>	1390	9,51	62,55	44,79	2785,75
<b>7 F</b>	1140	6,94	51,3	36,73	3130,79
<b>7 G</b>	1220	10,01	54,9	39,31	2322,92
<b>7 H</b>	1220	10,01	54,9	39,31	2322,92
<b>7 I</b>	920	8,47	41,4	29,64	2070,20
<b>8 A (sana)</b>	1240	6,85	55,8	39,95	3450,16
<b>8 B (sana)</b>	1480	9,07	66,6	47,69	3110,02
<b>8 C (sana)</b>	1480	9,58	66,6	47,69	2944,45
<b>8 D (sana)</b>	1390	7,65	62,55	44,79	3463,08
<b>8 E (sana)</b>	1250	9,79	56,25	40,28	2433,53
<b>8 F (sana)</b>	1120	8,98	50,4	36,09	2377,11
<b>8 G</b>	890	8,92	40,05	28,67	1901,66
<b>8 H</b>	830	11,41	37,35	26,74	1386,43
<b>8 I</b>	150	10,15	6,75	4,83	281,66
<b>8 J</b>	880	7,89	39,6	28,35	2125,76
<b>8 K</b>	90	6,46	4,05	2,90	265,53
<b>8 L</b>	100	7,22	4,5	3,22	263,98
<b>9 A (sana)</b>	1140	5,72	51,3	36,73	3798,55
<b>9 B (sana)</b>	--	--	--	--	--
<b>9 C (sana)</b>	580	4,75	26,1	18,69	2327,24
<b>9 D</b>	960	5,3	43,2	30,93	3452,26
<b>9 E</b>	1540	8,37	69,3	49,62	3506,74
<b>9 F</b>	780	4,21	35,1	25,13	3531,19
<b>9 G</b>	400	6,35	18	12,88	1200,59
<b>10 A (sana)</b>	1940	9,57	87,3	62,51	3863,65
<b>10 B (sana)</b>	1760	9,94	79,2	56,71	3374,70
<b>10 C (sana)</b>	1930	9,72	86,85	62,19	3784,42
<b>10 D</b>	1200	8,98	54	38,66	2546,90
<b>10 E</b>	1050	9,52	47,25	33,83	2102,13
<b>10 F</b>	1240	15,02	55,8	39,95	1573,47

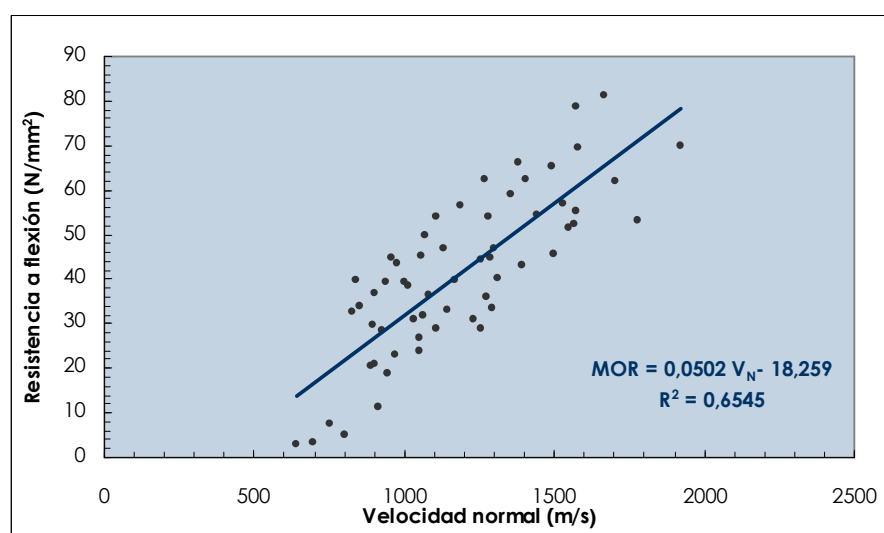
### VI.2.2.3. CORRELACIONES DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

En este apartado se estudian las correlaciones entre los resultados de los ensayos no destructivos (velocidades de ultrasonidos) y los parámetros resistentes (resistencia a flexión) obtenidos de los ensayos destructivos.

La obtención de estas correlaciones se ha realizado a partir del banco de datos compuesto por los resultados experimentales mostrados en los Capítulos VI.2.2.1 y VI.2.2.2. De cada probeta se recoge su pérdida de densidad, su velocidad normal de ultrasonidos y su resistencia a flexión según el ensayo descrito en la norma UNE 56537:1979.

Las correlaciones de los ensayos de ultrasonidos con parámetros resistentes ponen de manifiesto que, para la madera deteriorada, la velocidad normal de ultrasonidos ( $V_N$ ) es la variable que permite obtener un mejor ajuste de la recta de regresión. En un elemento de madera deteriorado, la resistencia a flexión residual está condicionada por la pérdida de densidad de dicho elemento, relacionada, a su vez, con la velocidad de ultrasonidos perpendicular a la fibra ( $V_N$ ). De este modo, a continuación, se obtiene:

- Relación entre la velocidad normal de ultrasonidos y la resistencia a flexión de un elemento de madera deteriorado (Figura VI.72).



**Figura VI.72.** Relación entre la velocidad normal de ultrasonidos y la resistencia a flexión para madera deteriorada de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L)

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
82	$MOR = 0,0502 V_N - 18,259$	$5,28 \cdot 10^{-15}$	0,6545

siendo;

MOR Tensión de rotura residual en flexión del elemento en  $N/mm^2$ .  
 $V_N$  Velocidad normal de ultrasonidos en m/s.

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación directa entre la velocidad normal de ultrasonidos de un elemento de madera deteriorado (condicionada por su pérdida de densidad) y su resistencia residual de rotura en flexión.
2. Para determinar la resistencia residual en flexión de un elemento de madera deteriorado se propone la siguiente ecuación:

$$\text{MOR} = 0,0502 V_N - 18,259 \quad R^2 = 0,6545$$

siendo;

MOR    Tensión de rotura en flexión en N/mm<sup>2</sup>.  
V<sub>N</sub>    Velocidad normal de ultrasonidos en m/s.



## **VI.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

---

### **VI.3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA**

VI.3.1.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS

VI.3.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS

VI.3.1.3. VALIDACIÓN DE LAS EXPRESIONES OBTENIDAS

VI.3.1.4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN SERVICIO. EL USO DE PEQUEÑAS PROBETAS DE 20 MM PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS DATOS

### **VI.3.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA**

## RESUMEN

Los resultados en este capítulo se exponen desglosados en dos grandes bloques, resultados de los ensayos sobre madera sana y resultados sobre madera deteriorada.

Los resultados sobre madera sana van dirigidos a obtener las correlaciones entre las medidas de resistógrafo, RM y la densidad de un elemento de madera de la especie *Pinus*. A partir de estas correlaciones se elabora una metodología de aplicación in situ que permite obtener la densidad de los elementos estructurales de madera en servicio, presentes en las obras de rehabilitación.

Los resultados sobre madera deteriorada permiten estimar, a través de las medidas de resistógrafo, la pérdida de densidad producida en un elemento, además de localizar la posición del deterioro dentro de la sección del elemento.

### VI.3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

#### VI.3.1.1. ENSAYOS SOBRE SECCIONES COMPLETAS

De cada uno de los 55 troncos de madera de *Pinus*, procedentes de las cimentaciones del Banco de Portugal en Lisboa, se extrae 1 sección para ensayo, libre de defectos y deterioro. Las dimensiones de estas secciones varían en función del diámetro de la pieza original con un espesor aproximado de  $3 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$  (Figura VI.73).



Figura VI.73. Sección de ensayo dentro de cada tronco.

Sobre esta sección se realizan los ensayos referidos a continuación:

1. Realización de las medidas con el resistógrafo en 2 direcciones ortogonales.
2. Determinación de la densidad aparente de la sección escogida.
3. Determinación de su contenido de humedad mediante secado en estufa.

Los resultados obtenidos en cada caso se exponen seguidamente.

##### **VI.3.1.1.1. Determinación de las propiedades físicas**

Los resultados de las propiedades físicas de las secciones de ensayo comprende la determinación de sus valores de densidad y humedad.

##### *Densidad*

Tras realizar los ensayos de resistógrafo se extrae cada sección de ensayo del tronco original y se determina su densidad como resultado de la relación entre su masa y su volumen. Dado que el volumen de las probetas no es regular, su medición se realiza mediante el procedimiento de la norma ASTM D2395-07ae1. La densidad está condicionada por el contenido de humedad, por lo que, para poder comparar cuantitativamente los resultados se han referido todos los valores a un contenido de humedad único, 12% ( $D_{12\% \text{HUMEDAD}}$ ) aplicando la corrección establecida en la norma UNE 384:2010. Esta norma especifica: "Cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad".

##### *Humedad*

Se determina el contenido de humedad de las probetas según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-1:2002. Para ello se introducen en la estufa a una temperatura  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  para su desecación hasta alcanzar el estado anhidro. El contenido de humedad se determina por diferencia de masas:

$$h(\%) = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100$$

siendo;

$m_w$  Masa inicial de la probeta (con humedad) en gramos, g.

$m_0$  Masa de la probeta tras la desecación (estado anhidro) en gramos, g.

Los resultados se recogen en la Tabla VI.43.

**Tabla VI.43.** Densidad y humedad de las probetas de ensayo determinada mediante norma ASTM-D2395-07ae1.

PROBETA N°	DENSIDAD (Kg/m³)		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m³)
	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
210	516,06	(14,87)	508,62
211	560,37	(15,23)	551,29
212	545,87	(14,67)	538,56
214	538,70	(14,79)	531,17
215	503,31	(15,25)	495,11
216	523,03	(15,28)	514,42
219	461,30	(14,90)	454,59
220	509,68	(14,66)	502,87
221	437,00	(14,52)	431,47
236	463,39	(15,15)	456,07
243	484,73	(16,09)	474,80
244	513,22	(15,56)	504,06
246	539,33	(17,38)	524,81
248	466,01	(14,36)	460,48
252	437,67	(14,04)	433,19
253	481,29	(16,02)	471,60
254	548,54	(16,28)	536,78
256	583,77	(16,80)	569,76
258	496,75	(16,38)	485,86
260	456,40	(13,94)	451,95
266	624,31	(16,43)	610,46
267	476,75	(15,50)	468,38
268	448,15	(15,21)	440,94
275	490,88	(14,84)	483,89
276	554,66	(16,11)	543,24
1416	493,44	(14,94)	486,17
1428	542,77	(15,98)	531,95
1442	410,25	(14,02)	406,09
1551	501,01	(15,02)	493,43
1565	477,97	(14,75)	471,37
1567	467,07	(16,82)	455,79
1582	461,33	(13,55)	457,73
1584	416,64	(16,76)	406,70
1611	495,97	(16,14)	485,68
1621	509,44	(15,59)	500,28
1627	497,11	(14,59)	490,66
1628	488,24	(14,46)	482,22
1640	465,29	(14,02)	460,58
1641	507,32	(14,88)	500,01
1642	487,20	(14,28)	481,63
1643	460,57	(15,29)	452,98
2539	471,44	(14,87)	464,66
4024	505,02	(14,68)	498,25
4032	496,12	(14,23)	490,57
4033	478,98	(14,43)	473,14
4738	531,59	(15,53)	522,18
4751	451,50	(14,56)	445,69
L4N	487,45	(15,98)	477,74
M4N	492,84	(15,49)	484,22
N4N	448,86	(14,35)	443,56
O4N	439,80	(13,37)	436,78
P4D	512,48	(14,18)	475,06
R4N	480,32	(14,35)	506,44
R40	466,45	(14,92)	488,83
S4D	500,94	(13,81)	462,21
U4D	496,08	(14,72)	494,12

### VI.3.1.1.2. Medidas de resistógrafo, RM

Sobre cada sección se realizan dos medidas de resistógrafo,  $RM_A$  y  $RM_B$  (Figura VI.74). A partir de estas medidas se aporta un valor representativo de la probeta, RM, obtenido como la media de ambos valores.

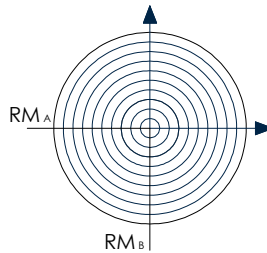


Figura VI.74. Medidas de resistógrafo realizadas en cada sección.

La obtención de los valores  $RM_A$  y  $RM_B$  no es inmediata. Su valor se calcula a partir del perfil resistográfico (Figura VI.75) originado en cada ensayo y representa la resistencia que ofrece la madera a la perforación a través de la potencia consumida por el resistógrafo durante el proceso. Esta potencia es interpretada en términos de variación de densidad en esa sección, suponiendo que a mayor densidad mayor será la resistencia al paso de la aguja. Así, la variabilidad que se refleja en un perfil resistográfico de madera sana corresponde con la diferencia de densidades entre la madera de primavera y de verano coincidiendo el ancho de los picos con el ancho de los anillos de crecimiento.

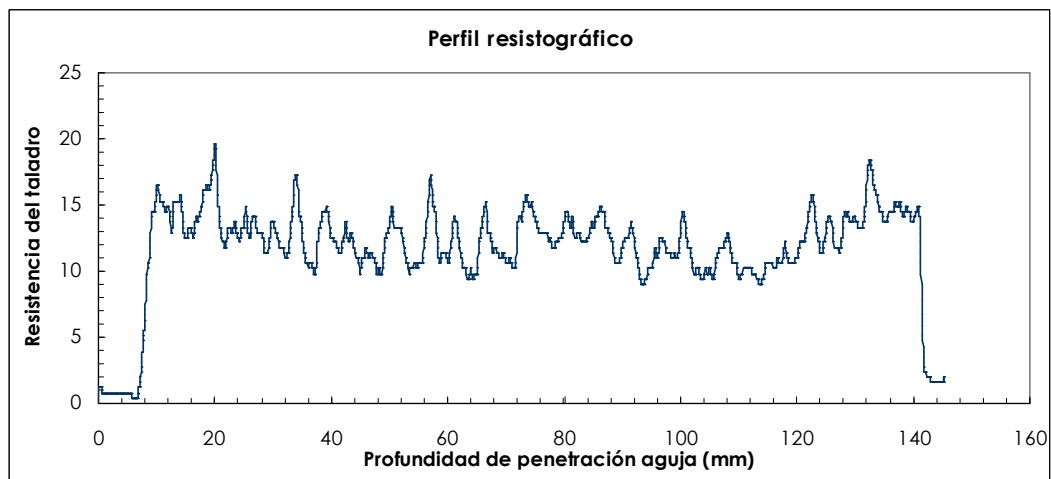


Figura VI.75. Perfil resistográfico,  $RM_A$  o  $RM_B$ , de una probeta.

El valor de RM se calcula como el área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada y mide el consumo medio del equipo por milímetro penetrado. Este valor puede expresarse como:

$$RM = \frac{\int_0^l \text{Área}}{l}$$

siendo;

$\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevados a la segunda potencia,  $\text{mm}^2$   
 $l$  Longitud total penetrada en milímetros, mm.

Los resultados de cada probeta se recogen en la Tabla VI.44. Todos los perfiles resistográficos se recogen en el Anejo 11.

**Tabla VI.44.** Mediciones radiales de resistógrafo,  $RM_A$  y  $RM_B$ , y media,  $RM$  en cada probeta.

Nº PROBETA	$RM_A$	$RM_B$	$RM$
210	12,37	13,08	12,72
211	14,60	16,79	15,70
212	15,01	15,93	15,47
214	14,60	14,31	14,46
215	18,07	13,93	16,00
216	12,66	12,95	12,81
219	12,30	12,09	12,19
220	13,35	13,98	13,67
221	12,53	12,50	12,51
236	12,67	11,85	12,26
243	13,07	13,71	13,39
244	15,43	14,44	14,94
246	15,06	17,46	16,26
248	12,62	12,85	12,73
252	11,31	11,32	11,31
253	12,74	13,89	13,32
254	16,07	16,01	16,04
256	16,99	20,20	18,59
258	12,25	13,92	13,09
260	13,15	12,08	12,62
261	11,84	15,19	13,51
266	19,37	15,77	17,57
268	12,00	11,68	11,84
275	17,52	13,96	15,74
276	16,18	16,96	16,57
141	13,50	13,31	13,41
142	15,70	15,12	15,41
144	11,62	11,99	11,81
155	13,67	13,49	13,58
1565	12,17	12,92	12,55
1567	13,03	13,67	13,35
1582	13,87	12,73	13,30
1584	12,25	12,70	12,48
1611	13,57	12,26	12,92
1621	13,81	14,10	13,95
1627	13,05	12,98	13,01
1628	13,05	13,12	13,09
1640	12,38	12,14	12,26
1641	13,56	14,08	13,82
1642	15,16	13,41	14,29
1643	12,01	12,60	12,31
2539	13,27	12,68	12,98
4024	13,12	12,84	12,98
4032	13,11	11,62	12,37
4033	12,13	12,33	12,23
4738	13,87	15,12	14,50
4751	11,67	12,62	12,14
L4N	14,75	20,20	17,48
M4N	14,33	14,63	14,48
N4N	14,06	12,56	13,31
O4N	13,22	10,68	11,95
P4D	14,73	13,77	14,25
R4N	12,12	13,76	12,94
R40	14,42	13,32	13,87
S4D	12,52	12,32	12,42
U4D	14,68	16,60	15,64

### VI.3.1.1.3. Correlación entre los resultados de los ensayos

Los perfiles resistográficos se interpretan en términos de variación de densidad dentro de una misma sección. De este modo, en una sección es posible distinguir la variabilidad entre las densidades de la madera de primavera y la madera de verano así como la anchura de sus anillos de crecimiento. Como consecuencia, se origina la posibilidad de establecer una correlación entre el valor medio del perfil resistográfico de una sección (representado en este estudio como la media de  $RM_A$  y  $RM_B$ ) y la densidad media de la madera que compone dicha sección (Figura VI.76).

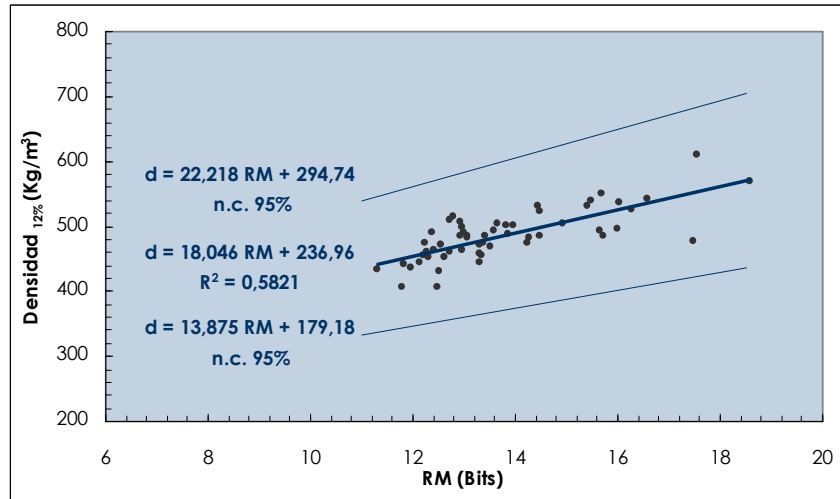


Figura VI.76. Correlación entre la densidad de la madera, d, y las medidas de resistógrafo, RM.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
56	$d = 18,046 RM + 236,96$	$8,22 \cdot 10^{-12}$	0,5821

A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener un valor de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

- Obtención del valor de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
56	$d = 22,218 RM + 294,74$

- Obtención del valor de densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

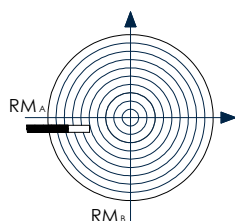
Nº valores	Ecuación de regresión
56	$d = 13,875 RM + 179,18$

La información extraída de esta regresión toma especial relevancia durante la fase de inspección de una estructura. Con una medida de resistógrafo, realizada mediante una perforación de 3 mm de diámetro, es posible obtener la densidad de la madera de una estructura sin necesidad de realizar ensayos destructivos para la extracción de muestras.

### VI.3.1.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS

#### VI.3.1.2.1. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS DE LONGITUD VARIABLE

En una segunda fase, para alcanzar un coeficiente de regresión más ajustado, se propone establecer la correlación anterior a partir de los resultados de densidad obtenidos con pequeñas probetas. Así, de cada una de las secciones de ensayo anteriores se extrae una pequeña muestra cilíndrica de 7 mm de diámetro y una longitud variable en cada caso (Figura VI.77).



**Figura VI.77.** Pequeña probeta cilíndrica de 7 mm de diámetro extraída en una zona próxima a la sección 1.

La extracción de muestras se ha realizado en todos los casos coincidiendo con uno de los dos ejes ensayados con el resistógrafo. Asimismo, por facilidad operativa, la muestra se ha extraído de una sección inmediatamente inferior a la sección de ensayo. A continuación se muestran los resultados de cada muestra.

##### VI.3.1.2.1.1. Determinación de las propiedades físicas

Los resultados de las propiedades físicas de las secciones de ensayo comprende la determinación de sus valores de densidad y humedad.

##### *Densidad*

La determinación de la densidad se realiza a partir de la relación entre la masa y el volumen, calculado como el volumen de un cilindro de 7 mm de diámetro, medido en 3 secciones, y una longitud variable (dimensiones medidas mediante pie de rey). Asimismo, el valor de densidad está condicionado por el contenido de humedad, por lo que, para poder comparar cuantitativamente los resultados se han referido todos los valores a un contenido de humedad único, 12% ( $D_{12\% \text{ HUMEDAD}}$ ) aplicando la corrección establecida en la norma UNE 384:2010. Esta norma especifica: "Cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% de humedad, y cuando el contenido de humedad sea menor del 12%, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad".

##### *Humedad*

Se determina el contenido de humedad de las probetas según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-1:2002. Para ello se introducen en la estufa a una temperatura  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  para su desecación hasta alcanzar el estado anhidro. El contenido de humedad se determina por diferencia de masas:

$$h(\%) = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100$$

donde:

- $m_w$  Masa inicial de la probeta (con humedad) en gramos, g.
- $m_0$  Masa de la probeta tras (estado anhidro) la desecación en gramos, g.

Los resultados se recogen en la Tabla VI.45.



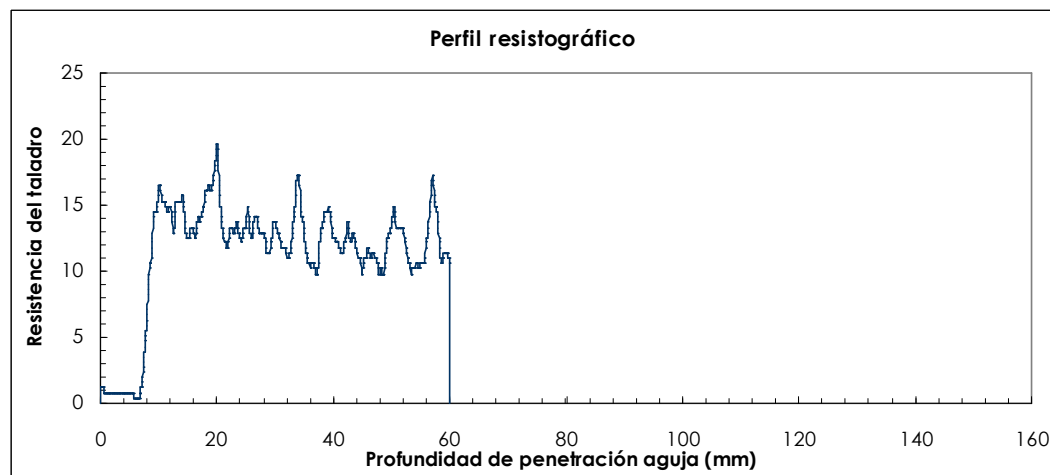
**ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS  
(DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

**Tabla VI.45.** Densidad y humedad de las pequeñas probetas.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m³)		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m³)
	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		
210	520,14	(14,87)	512,66
211	598,61	(15,23)	588,91
212	650,95	(14,67)	642,23
214	554,23	(14,79)	546,49
215	540,64	(15,25)	531,84
219	554,32	(14,90)	546,27
220	570,46	(14,66)	562,85
221	530,81	(14,52)	524,10
236	507,85	(15,15)	499,83
243	549,10	(16,09)	537,86
244	609,20	(15,56)	598,33
246	598,51	(17,38)	585,68
248	531,09	(14,36)	524,80
252	490,63	(14,04)	485,60
253	538,64	(16,02)	527,79
254	597,29	(16,28)	584,50
256	603,28	(16,80)	588,80
258	578,66	(16,38)	565,98
260	531,67	(13,94)	526,50
266	708,50	(16,43)	692,79
267	459,26	(15,50)	451,21
268	504,59	(15,21)	496,47
275	664,98	(14,84)	655,52
276	701,73	(16,11)	687,30
1416	551,10	(14,94)	542,99
1428	576,27	(15,98)	564,78
1442	495,65	(14,02)	490,63
1551	576,71	(15,02)	567,98
1565	510,19	(14,75)	503,15
1567	509,70	(16,82)	497,40
1582	515,40	(13,55)	511,38
1584	566,53	(16,76)	553,03
1627	557,34	(14,59)	550,11
1628	519,89	(14,46)	513,49
1640	569,51	(14,02)	563,75
1641	546,09	(14,88)	538,22
1642	547,76	(14,28)	541,52
1643	523,88	(15,29)	515,26
2539	509,99	(14,87)	502,66
4024	526,67	(14,68)	519,61
4032	521,48	(14,23)	515,65
4033	506,05	(14,43)	499,89
4738	629,52	(15,53)	618,39
4751	526,39	(14,56)	519,63
M4N	587,48	(15,49)	577,21
O4N	511,84	(13,37)	508,32
P4D	473,73	(14,18)	468,55
R4N	549,87	(14,35)	543,40
R4O	555,49	(14,92)	547,37
S4D	559,93	(13,81)	554,84
U4D	525,90	(14,72)	518,74

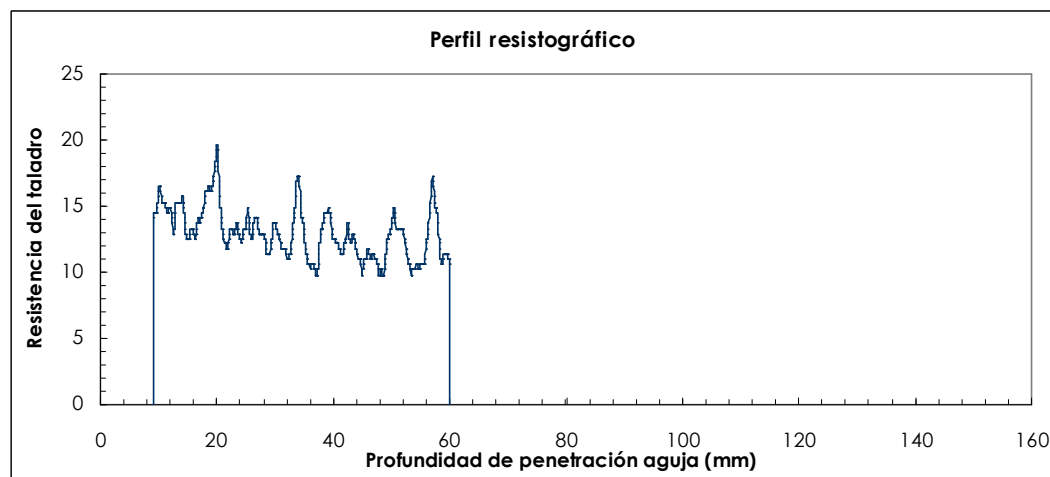
### VI.3.1.2.1.2. Medidas de resistógrafo, RM y RM'

Las medidas de resistógrafo se han extraído de los perfiles resistográficos de las piezas completas. Dependiendo del eje de ensayo del que se ha extraído la probeta se toma como perfil de referencia  $RM_A$  o  $RM_B$ . De estos perfiles,  $RM_A$  o  $RM_B$ , se selecciona el tramo que se corresponde con la longitud de la probeta extraída (Figura VI.78).



**Figura VI.78.** Perfil resistográfico,  $RM_A$  o  $RM_B$  de una probeta de 51 mm de longitud (a los 60 mm de profundidad hay que descontar el recorrido de la aguja hasta que penetra en la madera, en este caso, 9 mm aproximadamente).

En una segunda fase se ha planteado determinar la medida de resistógrafo desechando el primer tramo del perfil que coincide con el desplazamiento de la aguja hasta la penetración completa en el interior de la madera (Figura VI.79).



**Figura VI.79.** Perfil resistográfico,  $RM'_A$  o  $RM'_B$  de una probeta de 51 mm de longitud descontando el tramo de penetración en la madera.

Con estas dos mediciones se pretende verificar el grado influencia de este primer tramo del perfil resistográfico en las correlaciones y determinar en qué situación se obtiene un mejor ajuste de la recta de regresión.

El valor de RM se calcula como el área total bajo el tramo seleccionado de la curva resistográfica por unidad de longitud coincidiendo ésta con la longitud de la probeta.

Los resultados son recogidos en la Tabla VI.46.

**ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS  
(DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

**Tabla VI.46.** Mediciones completas de resistógrafo, RM, y mediciones de resistógrafo descontando el primer tramo del perfil resistográfico, RM', en las pequeñas probetas.

Nº PROBETA	RM	RM'
210	13,16	13,44
211	14,63	14,63
212	16,55	16,55
214	13,98	14,08
215	12,72	12,72
219	12,98	13,22
220	14,20	14,20
221	13,16	13,16
236	12,53	12,53
243	14,61	15,02
244	15,66	15,66
246	14,46	14,52
248	12,35	12,46
252	11,38	11,38
253	12,14	12,27
254	15,82	16,26
256	15,30	16,56
258	12,74	12,87
260	13,30	13,24
266	20,30	20,67
267	10,61	10,58
268	11,64	11,39
275	18,65	18,65
276	16,05	16,35
1416	13,76	13,76
1428	13,53	13,56
1442	13,04	13,04
1551	13,65	13,62
1565	11,67	11,90
1567	12,54	12,61
1582	13,91	13,91
1584	12,75	12,75
1627	14,32	14,32
1628	13,04	13,15
1640	12,77	12,77
1641	12,96	12,96
1642	14,83	14,83
1643	12,93	12,93
2539	13,62	13,62
4024	13,31	13,31
4032	11,92	11,92
4033	12,27	12,27
4738	14,27	14,38
4751	12,92	12,92
M4N	14,68	14,68
O4N	12,90	12,90
P4D	12,74	12,64
R4N	13,23	13,23
R40	12,46	13,01
S4D	12,62	12,62
U4D	14,75	14,75

### VI.3.1.2.1.3. Correlaciones entre los resultados de los ensayos

A continuación se representan las correlaciones entre la densidad de la madera y los perfiles resistográficos obtenidos para las pequeñas probetas. Estas correlaciones se muestran en dos situaciones:

- Considerando el perfil resistográfico completo (RM) (Figura VI.80)
- Sin considerar el primer tramo del perfil resistográfico (RM') (Figura VI.81).

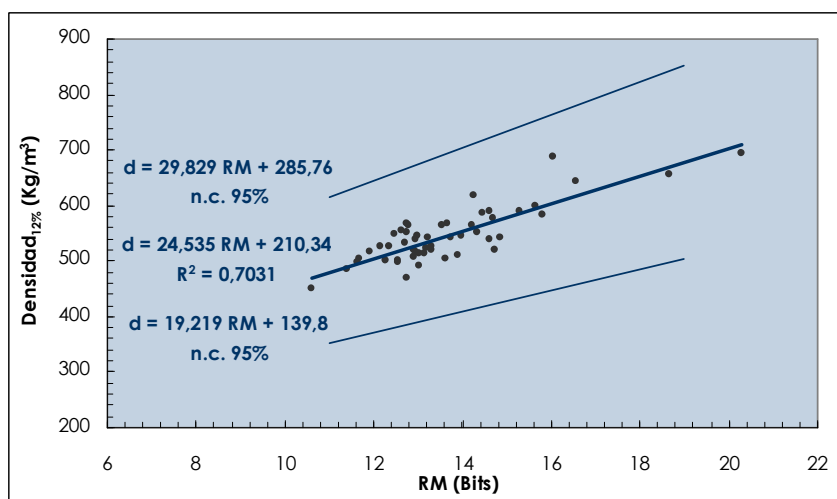


Figura VI.80. Correlación entre la densidad de la madera, d, y las medidas de resistógrafo, RM, para las pequeñas probetas de longitud variable.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
51	$d = 24,535 \text{ RM} + 210,34$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	0,7031

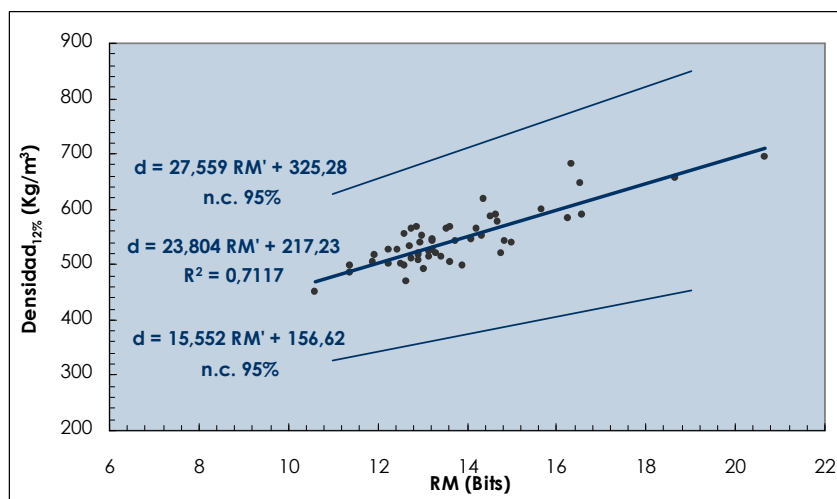
A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener un valor de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

- Obtención del valor de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 29,111 \text{ RM} + 273,30$

- Obtención del valor de densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 19,958 \text{ RM} + 147,36$



**Figura VI.81.** Correlación entre la densidad de la madera, d, y las medidas de resistógrafo, RM' (descontando el primer tramo del perfil resistográfico), para las pequeñas probetas de longitud variable.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
51	$d = 23,804 RM' + 217,23$	$7,82 \cdot 10^{-15}$	0,7117

A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener un valor de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

- Obtención del valor de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 28,154 RM' + 277,5$

- Obtención del valor de densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 19,454 RM' + 156,96$

**VI.3.1.2.2. ENSAYOS SOBRE PEQUEÑAS PROBETAS DE 20 MM DE LONGITUD**

Los resultados con pequeñas probetas han demostrado un mayor ajuste de la recta de regresión. Así, en aras de conseguir una nueva mejora de las correlaciones, repetimos los ensayos con pequeñas probetas reduciendo, en este caso, su longitud a 20 mm.

**VI.3.1.2.2.1. Determinación de las propiedades físicas**

Se determinan la densidad y la humedad según el procedimiento aplicado a las pequeñas probetas en el Capítulo VI.3.1.2.1.1. Los resultados se muestran en la Tabla VI.47.

**Tabla VI.47.** Densidad y humedad de las pequeñas probetas de 20 mm de longitud.

Nº PROBETA	DENSIDAD (Kg/m³) CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		DENSIDAD <sub>12</sub> (Kg/m³)
210	546,30	(14,87)	538,44
211	597,51	(15,23)	587,84
212	604,53	(14,67)	596,43
214	583,74	(14,79)	575,59
215	496,80	(15,25)	488,71
219	548,75	(14,90)	540,78
220	544,59	(14,66)	537,32
221	504,50	(14,52)	498,12
236	501,98	(15,15)	494,06
243	553,68	(16,09)	542,35
244	607,77	(15,56)	596,92
246	602,66	(17,38)	589,75
248	525,95	(14,36)	519,72
252	496,14	(14,04)	491,06
253	571,01	(16,02)	559,52
254	627,42	(16,28)	613,97
256	575,78	(16,80)	561,96
258	569,25	(16,38)	556,77
260	526,97	(13,94)	521,84
266	699,84	(16,43)	684,32
267	457,04	(15,50)	449,03
268	492,60	(15,21)	484,67
275	590,21	(14,84)	581,81
276	619,87	(16,11)	607,12
1416	562,83	(14,94)	554,54
1428	613,94	(15,98)	601,70
1442	513,43	(14,02)	508,22
1551	607,94	(15,02)	598,74
1565	548,05	(14,75)	540,49
1567	573,27	(16,82)	559,43
1582	533,48	(13,55)	520,61
1584	558,30	(16,76)	553,95
1627	582,06	(14,59)	574,51
1628	573,76	(14,46)	566,69
1640	530,36	(14,02)	525,00
1641	560,01	(14,88)	551,94
1642	565,93	(14,28)	559,47
1643	516,64	(15,29)	508,13
2539	508,82	(14,87)	501,51
4024	521,05	(14,68)	514,07
4032	523,84	(14,23)	517,98
4033	511,02	(14,43)	504,80
4738	537,42	(15,53)	527,92
4751	519,68	(14,56)	513,00
M4N	574,14	(15,49)	564,11
O4N	533,17	(13,37)	529,50
P4D	479,55	(14,18)	474,30
R4N	539,50	(14,35)	533,15
R40	495,15	(14,92)	487,92
S4D	509,67	(13,81)	505,04
U4D	563,38	(14,72)	555,72

**VI.3.1.2.2.2. Medidas de resistógrafo, RM y RM'**

En los perfiles resistográficos de las pequeñas probetas de longitud variable mostrados en el Capítulo VI.3.2.1.2. se ha seleccionado el tramo correspondiente a los 20 mm de la longitud de las nuevas piezas. Los valores de RM y RM' se muestran a continuación en la Tabla VI.48.

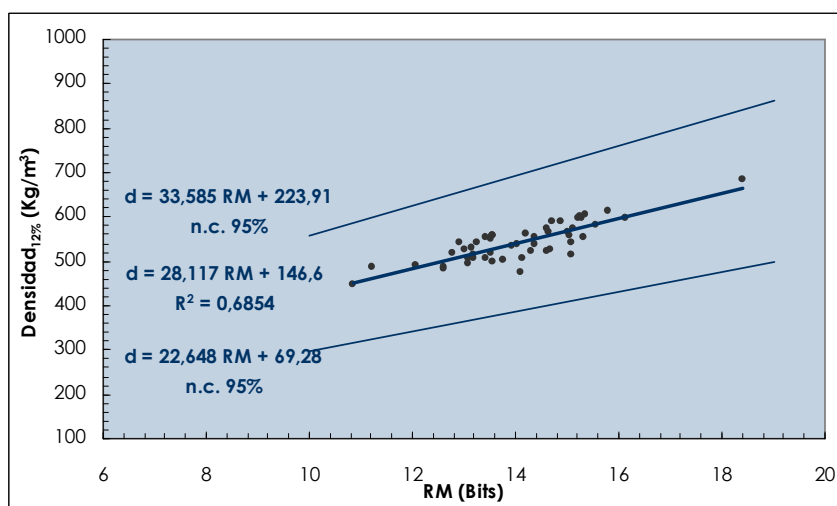
**Tabla VI.48.** Mediciones completas de resistógrafo, RM, y mediciones de resistógrafo descontando el primer tramo del perfil resistográfico, RM', en las pequeñas probetas de 20 mm de longitud.

Nº PROBETA	RM	RM'
210	14,05	14,53
211	14,72	15,24
212	15,28	16,19
214	15,11	15,38
215	12,62	13,13
219	13,27	14,76
220	14,36	15,39
221	13,55	13,86
236	13,09	13,34
243	15,07	15,22
244	16,13	16,50
246	14,89	15,33
248	12,79	13,22
252	12,08	13,06
253	13,55	13,85
254	15,78	16,67
256	14,2	15,56
258	13,57	14,11
260	14,32	14,29
266	18,41	20,59
267	10,85	11,25
268	12,62	12,62
275	15,56	16,03
276	15,35	16,40
1416	14,36	14,54
1428	15,26	17,29
1442	14,14	14,61
1551	15,23	15,49
1565	12,93	13,57
1567	13,56	14,39
1582	14,61	15,06
1584	13,44	13,80
1627	14,60	15,31
1628	15,00	15,14
1640	13,02	13,72
1641	13,52	14,18
1642	15,04	15,87
1643	13,44	13,72
2539	13,76	14,29
4024	15,07	15,05
4032	13,51	13,56
4033	13,18	13,47
4738	14,68	14,65
4751	13,17	13,35
M4N	14,66	15,57
O4N	13,15	15,39
P4D	14,10	14,47
R4N	13,92	14,11
R40	11,23	13,22
S4D	13,09	13,33
U4D	15,32	15,67

### VI.3.1.2.2.3. Correlaciones entre los resultados de los ensayos

A continuación se representan las correlaciones entre la densidad de la madera y los perfiles resistográficos obtenidos para las pequeñas probetas. Estas correlaciones se muestran en dos situaciones:

- Considerando el perfil resistográfico completo (RM) (Figura VI.82)
- Sin considerar el primer tramo del perfil resistográfico (RM') (Figura VI.83).



**Figura VI.82.** Correlación entre la densidad de la madera, d, y las medidas de resistógrafo, RM para las pequeñas probetas de 20 mm de longitud.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
51	$d = 28,117 \text{ RM} + 146,6$	$6,71 \cdot 10^{-14}$	0,6854

A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener un valor de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

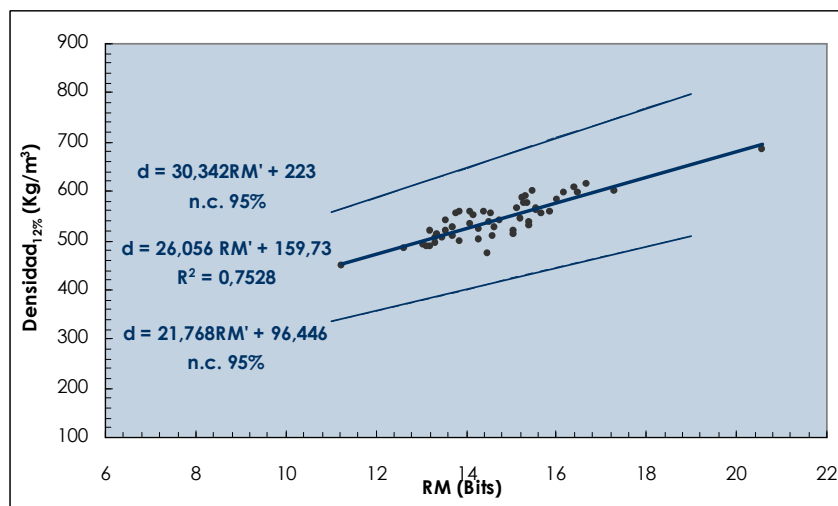
- Obtención del valor de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 33,585 \text{ RM} + 223,91$

- Obtención del valor de densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 22,648 \text{ RM} + 69,28$





**Figura VI.83.** Correlación entre la densidad de la madera,  $d$ , y las medidas de resistógrafo,  $RM'$  (descontando el primer tramo del perfil resistográfico), para las pequeñas probetas de 20 mm de longitud.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
51	$d = 26,056 RM' + 159,73$	$1,75 \cdot 10^{-16}$	0,7528

A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener un valor de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

- Obtención del valor de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 30,342 RM' + 223,00$

- Obtención del valor de densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

Nº valores	Ecuación de regresión
51	$d = 21,768 RM' + 96,446$

**VI.3.1.3. VALIDACIÓN DE LAS EXPRESIONES OBTENIDAS**

A continuación se realiza un estudio comparativo entre los valores de densidad estimados al emplear cada una de las expresiones obtenidas y los valores de densidad reales de una serie de probetas. Se pretende con ello verificar la validez de las expresiones obtenidas para la estimación in situ de los valores de densidad (Tablas VI.49 y VI.50).

Densidad real: Densidad obtenida mediante ensayo.

Densidad estimada 1: Densidad obtenida mediante la correlación extraída de los ensayos con secciones completas:

$$d = 18,046 \text{ RM} + 236,96 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Densidad estimada 2: Densidad obtenida mediante la correlación extraída de los ensayos con pequeñas probetas de longitud variable:

$$d = 24,535 \text{ RM} + 210,34 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

Densidad estimada 3: Densidad obtenida mediante la correlación extraída de los ensayos con pequeñas probetas de 20 mm de longitud:

$$d = 28,117 \text{ RM} + 146,6 \quad (\text{Kg/m}^3)$$

**Tabla VI.49.** Relación entre la densidad real y la densidad estimada según las distintas expresiones.

PROBETA	DENSIDAD REAL (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA 1 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA 2 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA 3 (Kg/m <sup>3</sup> )
11	524	440,69	487,34	464,04
12	469	404,60	438,27	407,80
17	572	447,28	496,29	474,30
18	545	391,97	421,09	388,12
40	568	435,37	480,10	455,74
41	432	377,71	401,71	365,91
42	492	398,47	429,92	398,24
43	608	554,02	641,41	640,61
44	594	422,65	462,80	435,92
45	551	446,29	494,94	472,75

**Tabla VI.50.** Relación del error cometido entre la densidad real y la densidad estimada en cada caso.

PROBETA	DENSIDAD REAL (Kg/m <sup>3</sup> )	ERROR ABSOLUTO 1	ERROR ABSOLUTO 2	ERROR ABSOLUTO 3
11	524	83,30	36,65	59,95
12	469	64,39	30,72	61,19
17	572	124,71	75,70	97,69
18	545	153,02	123,90	156,87
40	568	132,62	87,89	112,25
41	432	54,28	30,28	66,08
42	492	93,52	62,07	93,75
43	608	53,97	-33,41	-32,61
44	594	171,34	131,19	158,07
45	551	104,70	56,05	78,24
<b>ERROR MEDIO</b>		<b>103,58</b>	<b>60,10</b>	<b>85,15</b>

#### VI.3.1.4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DENSIDAD DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN SERVICIO. EL USO DE PEQUEÑAS PROBETAS DE 20 MM PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS DATOS

Predecir la densidad de los elementos estructurales en servicio presentes en las obras de rehabilitación es uno de los objetivos fundamentales de la aplicación del resistógrafo. Para ello, numerosos investigadores han obtenido sus curvas de regresión propias a partir de los trabajos experimentales desarrollados en laboratorio. No obstante, estos trabajos han arrojado unos resultados muy diversos según se muestran en la Tabla VI.51.

**Tabla VI.51.** Coeficientes de correlación obtenidos por diversos autores en la densidad de la madera y las medidas de resistógrafo.

AUTOR	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN, $R^2$ (Densidad – RM)
Ceraldi et al (2001)	0,66
Gantz (2002)	0,09 a 0,61
Lin et al (2003)	0,58
Tseng y Hsu (2004)	0,40; 0,19
Lee (2004)	0,90
Kasal & Anthony (2004)	0,21 a 0,69
Lourenço et al (2007)	0,38 (madera vieja); 0,36 (madera nueva)
Piazza & Riggio	0,004
Dulce et al (2011)	0,87

Estos resultados muestran cómo los diferentes métodos de ensayo pueden conducir a importantes variaciones en la eficiencia de las regresiones. Estas diferencias pueden ser debidas a diversos factores:

- Especie de madera
- Contenido de humedad
- Equipos de ensayo
- Condiciones de ensayo:
  - Velocidad de penetración de la aguja
  - Forma de realización de la perforación
  - Precisión tomada en el ensayo

Todos estos factores conllevan a que la extrapolación de estas regresiones a las nuevas situaciones que se presentan en una obra de rehabilitación pueda derivar en un error importante, cuestionando, por tanto, su fiabilidad.

Desde el presente trabajo de investigación se pretende desarrollar una metodología que permita calibrar los perfiles resistográficos obtenidos en cada caso a partir de valores de densidad obtenidos de la propia estructura mediante pequeñas muestras. Este método está basado en la extracción de una pequeña probeta de 7 mm de diámetro y 20 mm de longitud en las proximidades de la sección sobre la que se realiza el perfil resistográfico. Para ello se plantean dos metodologías de análisis:

- Metodología de análisis global:

Esta metodología se basa en desarrollar la curva de regresión propia de cada estructura. Para ello se realizan varias perforaciones y se extrae, en cada caso, una pequeña probeta en las proximidades de la sección sobre la que se toma el perfil resistográfico. A partir de estos datos se obtiene la correlación propia entre la densidad de la madera de dicha estructura ( $d$ ), obtenida de la pequeña muestra, y su medida de resistógrafo correspondiente (RM), obtenida de cada perforación. La aplicación de esta correlación

permite predecir el resto de valores de densidad de la estructura a partir de las medidas de resistógrafo.

Este método se fundamenta en el principio de que el número de probetas a extraer en una estructura debe ser limitado para reducir en lo posible los ensayos destructivos. La aplicación de esta metodología requiere estudiar el número de pequeñas muestras que es necesario extraer para apoyar su fiabilidad.

### ▪ Metodología de análisis individual:

La metodología de análisis individual se basa en la calibración del perfil resistográfico utilizando el valor de densidad obtenido en cada caso a partir de la pequeña probeta. De esta manera el perfil resistográfico se transforma en un perfil de densidad.

Ambas metodologías de análisis presentan las siguientes ventajas:

- Ajustan los parámetros del equipo a la situación encontrada en la estructura: especie de madera y contenido de humedad.
- Se convierte en una metodología de ensayo no dependiente de los ensayos de calibración realizados en laboratorio e independientes de la estructura.

### **VI.3.1.4.1. Metodología de análisis global**

Para plantear esta metodología de análisis se utiliza la correlación obtenida en el Capítulo VI.3.1.2.2.3. En este Capítulo se obtiene la correlación entre la densidad de la madera (obtenida a partir de las pequeñas muestras planteadas para el desarrollo de esta metodología) y las medidas de resistógrafo. La correlación obtenida presenta los siguientes valores estadísticos:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación (R²)
51	$d = 26,056 \text{ RM}' + 159,73$	$1,75 \cdot 10^{-16}$	0,7528

El estudio del error cometido por esta regresión se evalúa a través del valor medio del error porcentual (MPE) mediante la siguiente expresión:

$$\text{MPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \cdot 100$$

siendo:

- $y_i$  Valor real de densidad obtenido experimentalmente en Kg/m³.
- $\hat{y}_i$  Valor predicho de densidad a partir de la regresión  $d = 26,056 \text{ RM}' + 159,73$  en Kg/m³.
- N Tamaño de la muestra. En este caso 51

El estudio del error de esta regresión se representa en la Figura VI.84.

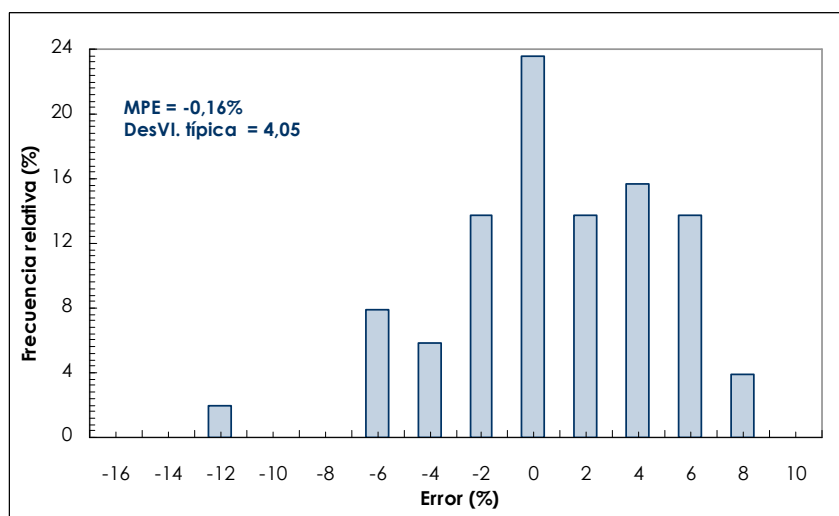


Figura VI.84. Estudio del error cometido mediante la aplicación de la regresión.

#### Validación de los resultados

Para estudiar la validez de los resultados obtenidos en esta regresión y analizar si los resultados obtenidos con la muestra estudiada (51 probetas) se pueden generalizar a la población de procedencia de la muestra (especie *Pinus*) se aplican las técnicas de remuestreo Jackknife y Bootstrap.

El procedimiento de análisis estadístico Jackknife se emplea como validación cruzada (cross-validation) de la curva de regresión. Para ello se realizan tantas iteraciones como número de valores posee la muestra. En este caso el número de valores (N) es 51 por lo que se realizan 51 iteraciones. En cada una de estas iteraciones un valor (i) debe dejarse fuera y estimar, a partir de los restantes valores, los parámetros de la curva de regresión.

$$\hat{d}_{\text{predecida,jack},i} = \hat{a}_i + \hat{b}_i \cdot \text{RM}_i$$

siendo;

$\hat{d}_{\text{predecida,jack},i}$  Valor de densidad predecida usando las estimaciones parciales en Kg/m<sup>3</sup>.

$\hat{a}$  y  $\hat{b}$  Valor de los parámetros de regresión obtenidos en cada iteración.

RM<sub>i</sub> Medida de resistógrafo en Bits.

El comportamiento global de la regresión se evalúa determinando en cada caso el coeficiente de determinación entre el valor de densidad predecida mediante la correlación obtenida ( $\hat{d}_{\text{predecida,jack},i}$ ) y el valor de densidad real obtenido experimentalmente ( $d_{\text{real}}$ ). Este coeficiente es designado como  $r_{\text{jack}}^2$ . El valor medio de todos los coeficientes de regresión obtenidos  $r_{\text{jack}}^2 = 0,74$ .

En la Figura VI.85 se muestra el histograma de los coeficientes parciales de determinación.

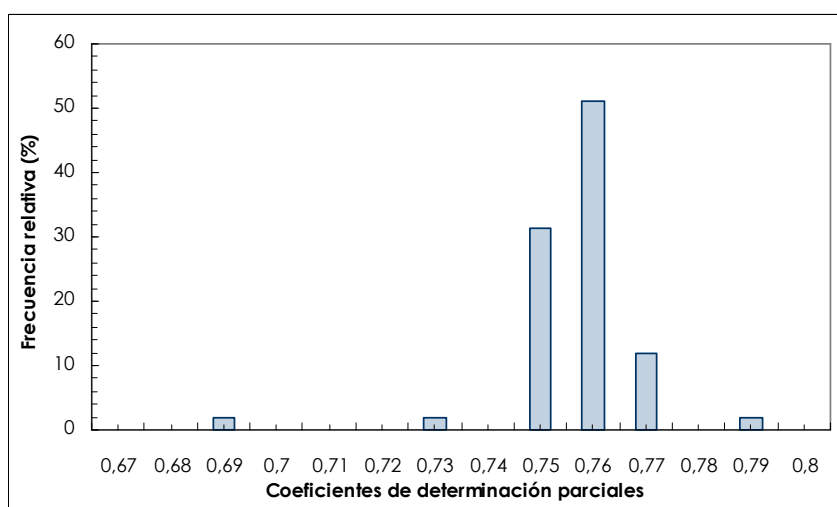


Figura VI.85. Histograma de los coeficientes parciales de determinación.

El estudio del error cometido por cada una de las regresiones se evalúa a través del valor medio del error porcentual (MPE). El valor medio obtenido de estos errores (MPE) es -0,18 %, comparable con el error obtenido en la regresión inicial, -0,17%. Este resultado muestra la robustez de la regresión.

En la Figura VI.86 se representa el valor medio del error porcentual (MPE) de cada una de las 51 curvas de regresión parciales.

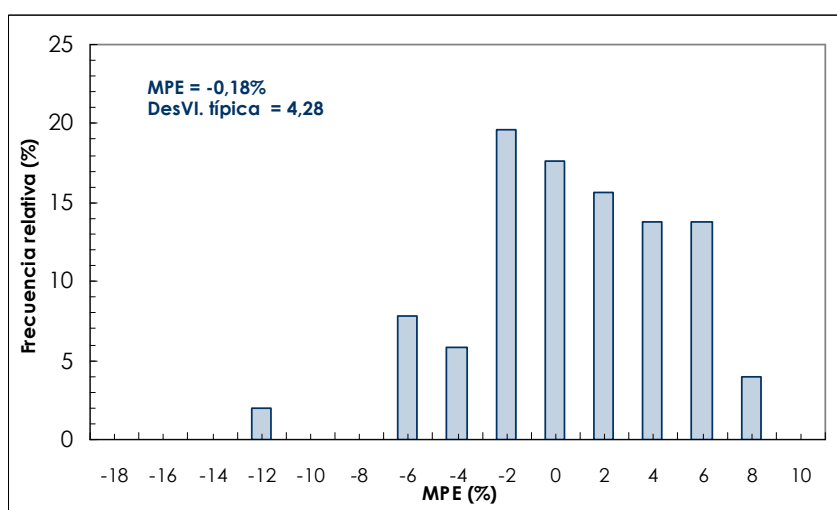


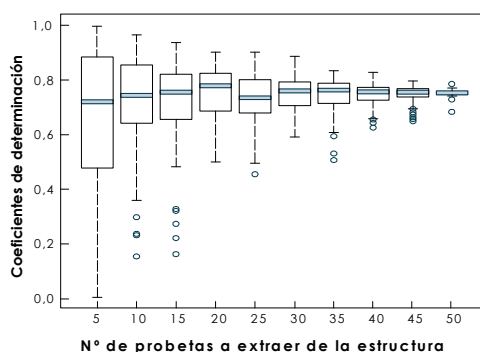
Figura VI.86. Estudio del error medio porcentual de cada una de las 51 curvas de regresión parciales.

El promedio de los errores medios porcentuales (MPE) de las 51 rectas de regresión parciales, considerando todos los errores de predicción, aporta un valor de -0,18%, comparable con el error medio porcentual (MPE) de la recta de regresión inicial de valor -0,16%, en la que se consideran los 51 resultados experimentales. Este resultado indica la robustez de los resultados de los ensayos.

### Determinación del número de probetas a extraer de la estructura

Una vez validado los resultados experimentales obtenidos en la muestra y determinar que la muestra estudiada es representativa de la población de madera de *Pinus*, se determina el número de probetas mínimo que es necesario extraer de la estructura para obtener una correlación fiable. Para ello se aplica la metodología de bootstrap. El número de probetas que componen cada muestra se estudia teniendo en cuenta que es un ensayo destructivo que debe realizarse sobre la estructura. Para ello se establecen 10 tamaños de muestras posibles para su análisis de regresión ( $n = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$ ). Para cada tamaño de muestra se realizan 100 simulaciones de análisis de regresión.

En la Figura VI.87 se representa el valor de los coeficientes de determinación en función del número de probetas que conforman la muestra.



**Figura VI.87.** Coeficientes de determinación en función del número de probetas que conforman la muestra.

La Figura VI.87 representa un gráfico de “caja”. En él se representa la “caja” que se extiende desde el cuartil inferior de los valores (25 percentil) hasta el cuartil superior (75 percentil). Por tanto, representa el intervalo que cubre el 50 percentil de los valores cuando se ordenan de menor a mayor. La línea central representa la mediana de los valores. Los bigotes (líneas superior e inferior) se dibujan desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo y máximo de los datos, a menos que haya valores muy alejados de la caja, que se representan mediante puntos. Estos puntos son llamados *puntos extremos* y se sitúan a una distancia superior a 1,5 veces el rango intercuartílico o ancho de caja.

El análisis de los resultados presentados revela que si el tamaño de la muestra es reducido (5 probetas) el rango de valores intercuartílicos, o ancho de caja, es muy amplio. El 50 percentil de los valores de los 100 coeficientes de regresión se sitúa entre 0,48 y 0,88. Asimismo, el rango de valores adyacentes (situados a menos de 1,5 veces el rango intercuartílico) es también muy amplio ocupando la totalidad del intervalo posible (0-1).

Si se aumenta el número de probetas, el intervalo de los valores intercuartílicos disminuye considerablemente, así como el rango de los valores adyacentes. Para un número de probetas igual a 10, el rango de valores intercuartílicos se sitúa entre 0,65 y 0,85. Los valores adyacentes ocupan el intervalo de 0,35 a 0,95. Con 15 probetas el rango de valores intercuartílicos se sitúa entre 0,66 y 0,81. Los valores adyacentes se sitúan entre 0,48 y 0,93. En ambos casos aparecen *valores extremos*. Si se aumenta el número de probetas hasta alcanzar un valor de 20, además de disminuir considerablemente el intervalo intercuartílico, desaparecen los *valores extremos*. Por todo ello, se considera que el número óptimo de probetas a extraer de una estructura para establecer su correlación característica es 20.

A partir del resultado del cálculo de la densidad ( $d$ ) de las 20 muestras extraídas de elementos de la estructura y de la obtención de sus perfiles resistográficos correspondientes (RM) se obtiene la correlación propia para esta estructura (RM- $d$ ). Esta correlación permitirá obtener los valores de densidad de los elementos restantes a partir de las medidas de resistógrafo exclusivamente.

#### VI.3.1.4.2. Metodología de análisis individual

La metodología de análisis individual se basa en obtener una probeta de cada elemento de la estructura en el que se realiza un perfil resistográfico. Esta probeta debe tomarse en las proximidades de la sección del perfil resistográfico (Figura VI.88).

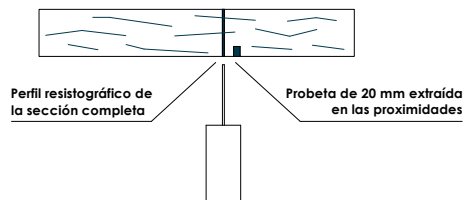


Figura VI.88. Metodología de análisis individual.

El valor de densidad de la probeta extraída coincide con el valor de densidad del primer tramo de la sección estudiada. Su correspondencia con el primer tramo del perfil resistográfico permite calibrar el resto del perfil y obtener un perfil de densidad global para la sección completa del elemento inspeccionado (Figura VI.89).

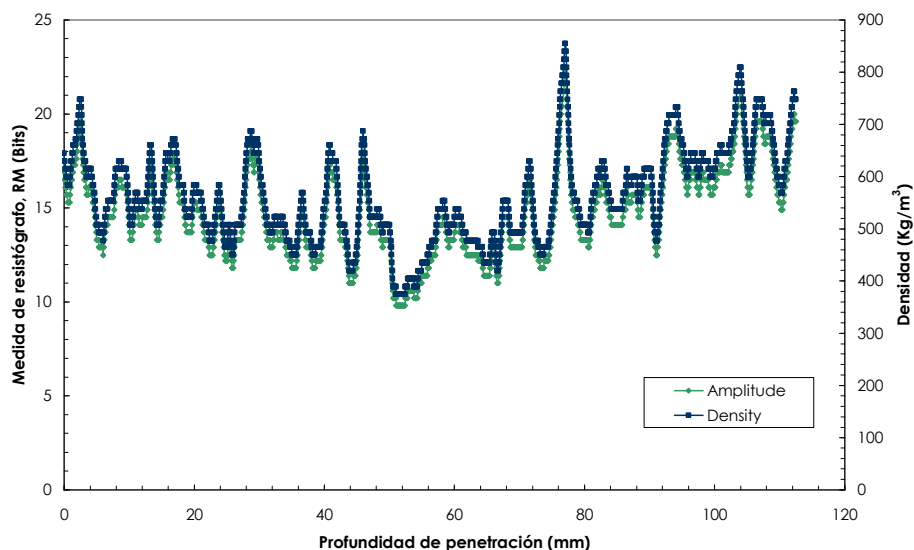


Figura VI.89. Perfil resistográfico y de densidad obtenido para una sección.

Ejemplo de aplicación práctica:

Tomamos una de las piezas estudiadas en este trabajo, la pieza 211. De esta pieza contamos con la siguiente información (detallada en secciones anteriores):

Densidad real de la sección completa: 551,29 Kg/m<sup>3</sup> (dato que se pretende obtener con esta metodología)

- Perfil resistográfico completo de la sección completa, RM: 14,60
- Perfil resistográfico del tramo de 20 mm coincidente con la probeta: 15,40
- Densidad de la probeta (obtenida experimentalmente): 587,84 Kg/m

Estimación del valor de densidad de la sección completa:



$$\frac{\text{Densidad}_{\text{probeta20mm}}(\text{Kg/m}^3)}{\text{RM}_{\text{probeta20mm}}} = \frac{\text{Densidad}_{\text{sección completa}}(\text{Kg/m}^3)}{\text{RM}_{\text{sección completa}}}$$

$$\frac{587,84}{15,40} = \frac{\text{Densidad}_{\text{sección completa}}(\text{Kg/m}^3)}{14,60}$$

$$\text{Densidad}_{\text{sección completa}}(\text{Kg/m}^3) = \frac{587,84}{15,40} \cdot 14,60 = 557,30 \text{Kg/m}^3$$

El valor de densidad estimado, 557,30 Kg/m<sup>3</sup>, es muy próximo al valor de densidad real de la pieza, 551,29 Kg/m<sup>3</sup>, lo cual demuestra la validez del método aportado.

#### **VI.3.1.4.3. Limitaciones de aplicación en obra de las metodologías desarrolladas**

Ambas metodologías han demostrado su validez para la aplicación en el proceso de estimación de la densidad de un elemento. No obstante, debe referirse los inconvenientes que su aplicación puede presentar:

- La extracción de probetas es un ensayo destructivo.
- Si se aplica la metodología de análisis individual deben extraerse tantas probetas de la estructura como elementos se analicen. Cuando esto no sea posible debe aplicarse la metodología de análisis global, que limita el número de probetas.

No obstante, a pesar de estos inconvenientes, debe señalarse que las probetas que se proponen para ambos procedimientos son piezas de pequeñas dimensiones, 20 mm de longitud y 7 mm de diámetro. Asimismo, en cada caso debe estudiarse el área más adecuada para la realización del ensayo resistográfico y la extracción de muestras. En todos los casos, debe pretenderse buscar zonas ocultas o menos visibles así como aquellas de menores solicitaciones estructurales.

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación entre la densidad de la madera y las medidas realizadas con resistógrafo. De esta forma coincidimos con otros autores (Ceraldi, 2001; Lourenço et al., 2007; Acuña et al., 2010).
2. Para determinar la densidad de un elemento de madera en función de las medidas de resistógrafo se proponen una serie de correlaciones:

→ Correlación obtenida a partir de grandes probetas:

$$d = 18,046 \text{ RM} + 236,96 \quad R^2 = 0,58$$

→ Correlaciones obtenidas a partir de pequeñas probetas:

Pequeñas probetas de longitud variable

$$\begin{aligned} d &= 24,535 \text{ RM} + 210,34 & R^2 &= 0,70 \\ d &= 23,804 \text{ RM}' + 217,23 & R^2 &= 0,71 \end{aligned}$$

Pequeñas probetas de 20 mm de longitud

$$\begin{aligned} d &= 28,117 \text{ RM} + 146,6 & R^2 &= 0,68 \\ d &= 26,056 \text{ RM}' + 159,73 & R^2 &= 0,75 \end{aligned}$$

siendo en cada caso;

d	Densidad del elemento de madera en Kg/m <sup>3</sup> .
RM	Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.
RM'	Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada descontando el primer tramo del perfil resistográfico coincidente con el desplazamiento de la aguja hasta penetrar en la madera.

Analizando el ajuste de las rectas de regresión y los resultados obtenidos de la validación de las expresiones en cada caso es posible concluir que los resultados obtenidos estimando la densidad con pequeñas probetas permiten establecer correlaciones con mejores coeficientes de ajuste y un mayor nivel de aproximación a la densidad real de la madera. La diferencia más notable entre los métodos de ensayo de cada lote consiste principalmente en el método de medición de sus densidades. La metodología de medición de la densidad con pequeñas probetas permite un mayor nivel de aproximación a la densidad real de la madera.

Asimismo, en los ensayos con pequeñas muestras las correlaciones mejoran al descontar el primer tramo del perfil resistográfico, es decir, al relacionar la densidad con RM' (área del perfil resistográfico por unidad de longitud descontando el tramo de desplazamiento de la aguja antes de penetrar en la madera). El primer tramo del perfil resistográfico provoca una alteración sobre el área total bajo la curva por unidad de longitud, cambio que es más apreciable cuanto menor es la longitud de la probeta, lo cual se confirma en los resultados obtenidos en las pequeñas probetas de 20 mm de longitud.

3. Se han desarrollado 2 metodologías para la obtención de la densidad de los elementos estructurales en servicio presentes en las obras de rehabilitación. Ambas metodologías emplean probetas de 20 mm para calibrar los resultados obtenidos en cada estructura.

- Metodología de análisis global:

Esta metodología se basa en desarrollar la curva de regresión propia de cada estructura. Para ello se realizan varias perforaciones con el resistógrafo y se extrae, en cada caso, una pequeña probeta en las proximidades de la sección sobre la que se toma el perfil resistográfico. A partir de estos datos se obtiene la correlación propia entre la densidad de la madera de la estructura en cuestión ( $d$ ), obtenida de la pequeña muestra, y su medida de resistógrafo correspondiente ( $RM$ ), obtenida de cada perforación. El número de probetas más apropiado para conseguir un coeficiente de determinación ajustado, según los estudios realizados, debe aproximarse a 20. La aplicación de esta correlación permite predecir el resto de valores de densidad de la estructura a partir de las medidas de resistógrafo.

- Metodología de análisis individual:

La metodología de análisis individual se basa en obtener una probeta de cada elemento de la estructura en la que se realiza un perfil resistográfico. La probeta debe extraerse en las proximidades de la sección donde se realiza el perfil resistográfico.

El valor de densidad de la probeta extraída coincide con el valor de densidad del primer tramo de la sección estudiada. Su correspondencia con el primer tramo del perfil resistográfico permite calibrar el resto del perfil y obtener un perfil de densidad global de la sección del elemento inspeccionado.

### VI.3.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

Los ensayos sobre madera deteriorada se han realizado en 5 vigas de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) procedentes de un forjado de entrevigado cuajado. Las vigas tienen una escuadría de 12x18 cm y una longitud de 4 m aproximadamente.

Con estos ensayos se pretende extraer la correlación entre la pérdida de densidad de la madera y las medidas de resistógrafo. De este modo, además de localizar exactamente donde se ha producido el deterioro gracias al perfil resistográfico será posible determinar la pérdida de densidad, con respecto a la madera sana, que se ha producido.

#### **VI.3.2.1. Determinación de las propiedades físicas**

Los resultados de las propiedades físicas de las secciones de ensayo comprende la determinación de sus valores de humedad y pérdida de densidad.

##### *Humedad*

La medición del contenido de humedad se ha realizado mediante xilohigrómetro digital de resistencia eléctrica siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002. Las mediciones se realizan en cada una de las secciones de ensayo de las piezas. Los resultados son utilizados para referenciar otras mediciones, como la velocidad de ultrasonidos, a un contenido de humedad de referencia del 12%.

##### *Pérdida de densidad*

Dada la dificultad de obtener experimentalmente la pérdida de densidad de las secciones de ensayo se decide estimar dicha pérdida mediante ensayos de ultrasonidos empleando las correlaciones obtenidas en el Capítulo VI.2.2. del presente trabajo de investigación. Se realizan 3 mediciones de velocidad de ultrasonidos por sección, perpendiculares a la fibra y corrigiendo los resultados obtenidos según el contenido de humedad medido en dicha sección.

Los resultados se recogen en la Tabla VI.52.

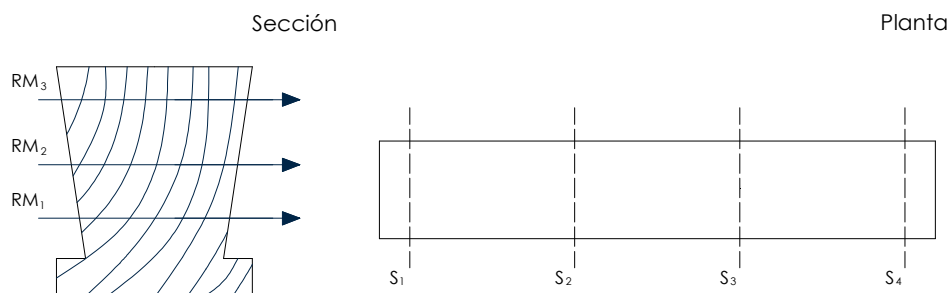
**ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS  
(DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

**Tabla VI.52.** Humedad y pérdida de densidad referida al 12% de humedad de cada una de las secciones de ensayo de las 5 vigas de madera deteriorada.

N° VIGA	SECCIÓN	MEDIDA	HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL DE ULTRASONIDOS <sub>12</sub> (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD <sub>12</sub> ESTIMADA (%)
1	1	1	9,20	2084,72	0,00
		2	9,20	2244,34	0,00
		3	9,20	1163,12	7,20
	2	1	9,20	2424,34	0,00
		2	9,20	2036,37	0,00
		3	9,20	1899,14	0,00
	3	1	9,10	2209,90	0,00
		2	9,10	1862,64	0,00
		3	9,10	1360,11	0,00
	4	1	8,90	2374,04	0,00
		2	8,90	1917,72	0,00
		3	8,90	1057,93	7,20
2	1	1	9,30	920,218	16,82
		2	9,30	799,17	21,61
		3	9,30	675,41	26,51
	2	1	8,90	1492,10	0,00
		2	8,90	1647,85	0,00
		3	8,90	428,29	36,30
	3	1	9,80	2563,91	0,00
		2	9,80	1730,69	0,00
		3	9,80	729,17	24,38
	4	1	8,40	2747,34	0,00
		2	8,40	1874,16	0,00
		3	8,40	1853,13	0,00
3	1	1	11,00	1058,45	11,34
		2	11,00	764,40	22,99
		3	11,00	--	-
	2	1	11,80	2311,71	0,00
		2	11,80	1767,01	0,00
		3	11,80	630,55	28,29
	3	1	10,60	2340,10	0,00
		2	10,60	1793,14	0,00
		3	10,60	993,11	13,23
	4	1	10,10	1152,36	7,62
		2	10,10	1035,01	12,27
		3	10,10	764,92	22,97
4	1	1	10,10	1552,23	0,00
		2	10,10	--	-
		3	10,10	--	-
	2	1	9,80	2011,67	0,00
		2	9,80	1177,34	6,63
		3	9,80	1144,43	7,94
	3	1	7,30	1707,78	0,00
		2	7,30	1679,21	0,00
		3	7,30	1603,55	0,00
	4	1	10,00	1745,88	0,00
		2	10,00	1355,95	0,00
		3	10,00	1957,17	0,00
5	1	1	10,20	2157,58	0,00
		2	10,20	--	-
		3	10,20	--	-
	2	1	8,90	2024,09	0,00
		2	8,90	1946,92	0,00
		3	8,90	1034,58	12,29
	3	1	11,50	1612,10	0,00
		2	11,50	1582,34	0,00
		3	11,50	1051,33	11,62
	4	1	12,80	1812,41	0,00
		2	12,80	2021,20	0,00
		3	12,80	1290,16	2,17

### VI.3.2.2. Medidas de resistógrafo, RM

Sobre cada sección se realizan 3 medidas de resistógrafo, RM<sub>1</sub>, RM<sub>2</sub> y RM<sub>3</sub> (Figura VI.90).



**Figura VI.90.** Medidas de resistógrafo realizadas en cada sección de las vigas de madera deteriorada.

A partir de los perfiles resistográficos obtenidos en cada sección se calculan los valores de RM<sub>1</sub>, RM<sub>2</sub> y RM<sub>3</sub> como el área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada midiendo el consumo medio del equipo por milímetro penetrado. Dichos valores se calculan mediante la siguiente expresión:

$$RM = \frac{\int_0^I \text{Área}}{I}$$

siendo;

- $\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevados a la segunda potencia, mm<sup>2</sup>.
- $I$  Longitud total penetrada en milímetros, mm.

Los resultados se recogen en la Tabla VI.53. Todos los perfiles resistográficos realizados en cada viga se recogen el Anejo 12.

**ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS  
(DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

**Tabla VI.53.** Humedad y medida de resistógrafo de cada una de las secciones de ensayo de las 5 vigas de madera deteriorada.

N° VIGA	SECCIÓN	MEDIDA	HUMEDAD (%)	RM
1	1	1	9,20	10,58
		2	9,20	10,91
		3	9,20	10,50
	2	1	9,20	13,16
		2	9,20	10,13
		3	9,20	11,30
	3	1	9,10	11,74
		2	9,10	12,48
		3	9,10	11,25
	4	1	8,90	10,31
		2	8,90	9,08
		3	8,90	9,95
2	1	1	9,30	6,65
		2	9,30	6,25
		3	9,30	8,08
	2	1	8,90	8,40
		2	8,90	9,71
		3	8,90	6,37
	3	1	9,80	10,29
		2	9,80	9,16
		3	9,80	7,31
	4	1	8,40	10,42
		2	8,40	9,88
		3	8,40	12,06
3	1	1	11,00	8,04
		2	11,00	5,69
		3	11,00	2,83
	2	1	11,80	8,07
		2	11,80	8,42
		3	11,80	4,46
	3	1	10,60	8,14
		2	10,60	8,26
		3	10,60	7,70
	4	1	10,10	7,55
		2	10,10	7,03
		3	10,10	6,68
4	1	1	10,10	9,95
		2	10,10	-
		3	10,10	-
	2	1	9,80	10,44
		2	9,80	7,71
		3	9,80	7,79
	3	1	7,30	11,04
		2	7,30	10,10
		3	7,30	10,03
	4	1	10,00	11,37
		2	10,00	10,71
		3	10,00	10,79
5	1	1	10,20	5,65
		2	10,20	-
		3	10,20	-
	2	1	8,90	9,88
		2	8,90	10,28
		3	8,90	8,23
	3	1	11,50	11,09
		2	11,50	10,16
		3	11,50	10,68
	4	1	12,80	11,36
		2	12,80	10,63
		3	12,80	10,43

### VI.3.2.3. Correlación entre los resultados de los ensayos

Los perfiles resistográficos se interpretan en términos de variación de densidad dentro de una misma sección. De este modo, es posible localizar pérdidas de densidad producidas en zonas concretas de una sección. Para cuantificar esa pérdida de densidad se propone una correlación entre las medidas de resistógrafo y la pérdida de densidad (Figura VI.91).

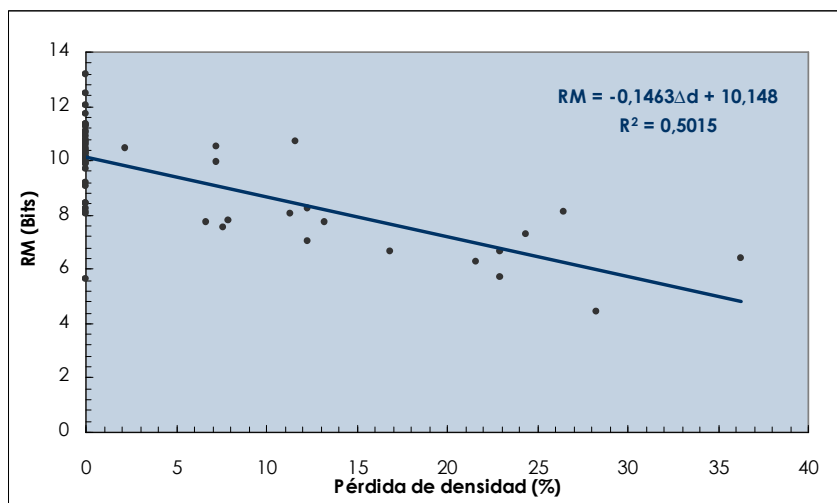


Figura VI.91. Correlación entre la densidad de la madera,  $d$ , y las medidas de resistógrafo, RM.

El resumen estadístico de la correlación obtenida es el siguiente:

Nº valores	Ecuación de regresión	P (95%)	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
55	$RM = -0,1463 \Delta d + 10,148$	$1,47 \cdot 10^{-9}$	0,5015

De forma análoga, es posible conocer la pérdida de densidad ( $\Delta d$ ) de una sección a partir de la medida de resistógrafo obtenida, (RM) mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$\Delta d = 69,364 - 6,8352 RM$$

siendo,

$\Delta d$  Pérdida de densidad en porcentaje, %.

RM Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.

A partir de esta regresión se establecen las correlaciones que permiten obtener la pérdida de densidad tanto por exceso como por defecto con un nivel de confianza del 95%:

- Obtención del valor de pérdida de densidad por exceso, con un nivel de confianza de 95%:

$$\Delta d = 52,123 - 5,3625 RM$$

- Obtención del valor de la pérdida densidad por defecto, con un nivel de confianza de 95%:

$$\Delta d = 99,671 - 9,4246 RM$$



**Discusión de resultados y conclusiones:**

1. Se ha determinado que existe una relación entre la pérdida de densidad de la madera y las medidas realizadas con resistógrafo. Los ensayos realizados mediante resistógrafo permiten localizar la sección donde se ha producido el deterioro y cuantificar su pérdida de densidad.

$$\Delta d = 69,364 - 6,8352 \text{ RM}$$

$$R^2 = 0,5015$$

Siendo;

$\Delta d$	Pérdida de densidad del elemento de madera en porcentaje, %.
RM	Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.



## **VI.4. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS**

---

### **VI.4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS**

- VI.4.1.1. CORRELACION ENTRE PALPADORES DE ULTRASONIDOS**
- VI.4.1.2. DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN MÍNIMA ENTRE PALPADORES, ESCUADRÍA MÍNIMA DE ENSAYO**
- VI.4.1.3. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LOS NUEVOS PALPADORES DE ULTRASONIDOS**

### **VI.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN**

- VI.4.2.1. ESTUDIOS PREVIOS DE LA EDIFICACIÓN**
- VI.4.2.2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA INSPECCIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE ULTRASONIDOS**
- VI.4.2.3. PLAN DE ENSAYOS**
- VI.4.2.4. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE VIGAS A ENSAYAR. PLAN DE MUESTREO**

### RESUMEN

Hasta ahora, la inspección de forjados mediante la técnica de ultrasonidos ha estado reservada a aquellos forjados cuyas vigas son accesibles desde el exterior. Desde el presente trabajo de investigación se pretende dar respuesta a un campo de inspección comprendido por aquellos forjados cuyas vigas están embebidas por el material de relleno de su entrevigado, los llamados forjados de entrevigado cuajado.

Con este objetivo prioritario se ha elaborado un nuevo transductor de ultrasonidos que permite acceder al interior de los elementos y establecer, de esta forma, el diagnóstico sobre su estado de conservación. No obstante, antes de su puesta en uso es necesario verificar su funcionamiento para determinar los factores de corrección precisos así como instaurar las nuevas correlaciones. A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados con este nuevo transductor para, posteriormente, plantear una metodología de inspección.

#### **VI.4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS**

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados con el transductor de ultrasonidos elaborado. Estos ensayos tratan de verificar el funcionamiento del nuevo transductor de ultrasonidos, previo a su uso para el desarrollo de una metodología de inspección de forjados de entrevigado cuajado. Con este objetivo se han realizado mediciones empleando los dos transductores de ultrasonidos (el palpador corto tradicional y el nuevo palpador desarrollado) contrastando los resultados obtenidos en cada caso.

##### **VI.4.1.1. CORRELACION ENTRE PALPADORES DE ULTRASONIDOS**

Para estudiar la correlación existente entre el palpador tradicional de ultrasonidos y el nuevo palpador se han realizado dos tipos de mediciones:

- Exteriores: sistema de inspección utilizado hasta el momento.
- Interiores: simulando las nuevas condiciones de inspección mediante la perforación de las vigas para introducir el nuevo palpador.

##### **VI.4.1.1.1. Mediciones exteriores**

Se han realizado mediciones longitudinales y perpendiculares a la fibra de las piezas.

Para las mediciones longitudinales a la fibra se ha empleado:

- 2 probetas de 30 cm,
- 2 probetas de 50 cm,
- 3 probetas de 100 cm y
- 1 probeta de 120 cm.

Para las medidas perpendiculares (normales) a la fibra se ha empleado una única probeta en la que se han marcado varias secciones y varios puntos de medición en cada sección.

En cada pieza, se han realizado mediciones en una o varias secciones con los dos palpadores de ultrasonidos, el palpador tradicional (palpador corto) y el nuevo palpador (palpador largo).

A continuación se muestran las Tablas VI.54 y VI.55 con los resultados obtenidos.

**Tabla VI.54.** Mediciones exteriores longitudinales a la fibra realizadas con los dos palpadores de ultrasonidos.

Nº PROBETA/ SECCIÓN	LONGITUD PIEZA (cm)	T <sub>1</sub> (μs) PALPADOR CORTO	T <sub>2</sub> (μs) PALPADOR LARGO	RETARDO (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )
1 <sub>A</sub>	30	51,7	113,8	62,1
1 <sub>B</sub>	30	50,7	112,3	61,6
2 <sub>A</sub> /1	50	87,6	149,5	61,9
2 <sub>A</sub> /2	50	90,7	152,3	61,6
2 <sub>A</sub> /3	50	91	153,1	62,1
2 <sub>B</sub> /1	50	95,7	156,7	61
2 <sub>B</sub> /2	50	97,8	159,5	61,7
2 <sub>B</sub> /3	50	95	156	61
3 <sub>A</sub>	100	165,6	226,6	61
3 <sub>B</sub>	100	169	229,8	60,8
3 <sub>C</sub>	100	171,9	232,3	60,4
4 <sub>A</sub> /1	120	183	244,1	61,1
4 <sub>A</sub> /2	120	185,3	247,1	61,8
4 <sub>A</sub> /3	120	185,6	247	61,4
4 <sub>A</sub> /4	120	185,7	245,6	59,9
4 <sub>A</sub> /5	120	191	253,1	62,1
4 <sub>A</sub> /6	120	188,2	248,8	60,6
4 <sub>A</sub> /7	120	191,6	253,6	62
4 <sub>A</sub> /8	120	192,5	249,1	56,6
			<b>RETARDO MEDIO</b>	<b>61,1</b>

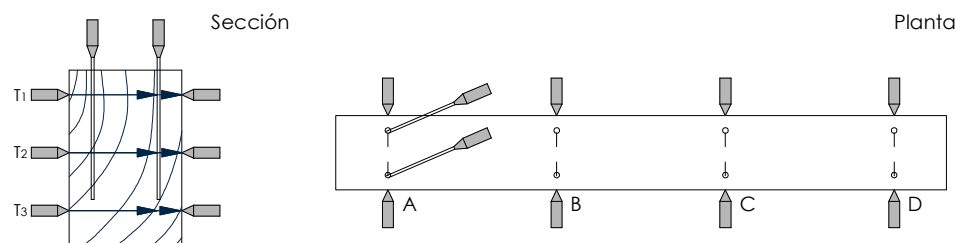
**Tabla VI.55.** Mediciones exteriores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con los dos palpadores de ultrasonidos.

Nº PROBETA	ANCHO (cm)/ SECCIÓN	T <sub>1</sub> (μs) PALPADOR CORTO	T <sub>2</sub> (μs) PALPADOR LARGO	RETARDO (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )
1	11 cm / 1	68,6	130,1	61,5
1	11 cm / 1	55,3	114,9	59,6
1	11 cm / 1	137,5	197,9	60,4
1	11 cm / 2	68	128,8	60,8
1	11 cm / 2	53,4	112,9	59,5
1	11 cm / 2	91,8	150,9	59,1
1	11 cm / 3	67,9	128,5	60,6
1	11 cm / 3	51	112,5	61,5
1	11 cm / 3	67,7	131,1	63,4
1	11 cm / 4	69,3	129,6	60,3
1	11 cm / 4	55,2	112,9	57,7
1	11 cm / 4	67,6	129,1	61,5
			<b>RETARDO MEDIO</b>	<b>60,5</b>

Los resultados de las mediciones (longitudinales y perpendiculares a la fibra) apuntan a un **retardo medio del nuevo palpador de 60,8 μs**.

#### VI.4.1.1.2. Mediciones interiores

Determinado el retardo medio en las mediciones realizadas con el nuevo transductor respecto a los resultados obtenidos con el transductor de ultrasonidos tradicional, se trata de establecer la correlación existente entre las mediciones de velocidad de ultrasonidos tomadas desde el exterior de las piezas y las medidas de velocidad tomadas desde el interior (Figura VI.92).



**Figura VI.92.** Mediciones exteriores e interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con el nuevo palpador de ultrasonidos.

Para estos ensayos se ha preparado una viga en la que se han marcado varias secciones (A, B, C, D). Asimismo, dentro de cada sección se trazan tres alturas de ensayo (30, 90, 150 mm). En cada sección y altura de ensayo se han realizado mediciones de velocidad de ultrasonidos, inicialmente, desde el exterior y, a continuación, desde el interior. Las mediciones desde el interior han requerido ir aumentando progresivamente la profundidad de los taladros de 30 a 90 y 150 mm. El diámetro de las perforaciones es proporcionado por la configuración del palpador, siendo de 6 mm. Todas las mediciones (exteriores e interiores) se han realizado con el nuevo palpador.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados en la Tabla VI.56.

**Tabla VI.56.** Mediciones exteriores e interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas con el nuevo palpador de ultrasonidos.

SECCIÓN/ PROFUNDIDAD (mm)	T <sub>1</sub> (μs) MEDIDA EXTERIOR (SEPARACIÓN 110 mm)	V <sub>1</sub> corregida (m/s) (sin retardo)	T <sub>2</sub> (μs) MEDIDA INTERIOR (SEPARACIÓN 75 mm)	V <sub>2</sub> corregida (m/s) (sin retardo)
A / 30 mm	130,1	1601,16	111,5	1497,00
A / 90 mm	114,9	2056,07	97,9	2054,79
A / 150 mm	175,2	966,6	140,4	949,36
B / 30 mm	128,8	1632,04	112,6	1464,84
B / 90 mm	112,9	2135,92	102,1	1842,75
B / 150 mm	150,9	1229,05	116,2	1368,61
C / 30 mm	128,5	1639,34	112,9	1456,31
C / 90 mm	112,5	2152,64	95,1	2225,51
C / 150 mm	135,1	1492,53	114,3	1417,76
D / 30 mm	129,6	1612,90	s.d.	s.d.
D / 90 mm	112,9	2135,92	95,4	2205,88
D / 150 mm	129,1	1624,81	s.d.	s.d.

Comparando los resultados obtenidos de las mediciones realizadas desde el interior y el exterior de las piezas se revela que **no existen diferencias significativas en las velocidades obtenidas en cada caso y que pueden despreciarse los efectos de transmisión por fuste.**

#### VI.4.1.2. DETERMINACIÓN DE LA SEPARACIÓN MÍNIMA ENTRE PALPADORES, ESCUADRÍA MÍNIMA DE ENSAYO

Tras determinar que la influencia de la transmisión por el fuste del palpador es despreciable, se plantea la necesidad de estudiar las limitaciones de aplicación del nuevo dispositivo en la medición de las velocidades perpendiculares a la fibra (normales).

La toma de datos de los ensayos de ultrasonidos en la dirección perpendicular a la fibra de las piezas (velocidades normales) implica que la separación entre los transductores está condicionada por la escuadría de las piezas. Tradicionalmente, en la inspección de forjados, este parámetro no ha supuesto una limitación ya que las mediciones han sido realizadas desde el exterior, contando, por lo tanto, con la escuadría completa de las vigas. No obstante, la tipología constructiva de este nuevo campo de inspección, los forjados de entrevigado cuajado, plantea unas nuevas condiciones de ensayo. En este caso, la toma de datos se realiza desde el interior de la pieza lo que implica que la distancia libre entre los transductores venga limitada, además de por la escuadría de los elementos, por el propio dispositivo de ensayo, los nuevos transductores de ultrasonidos. La distancia entre los transductores se determina a partir de la expresión:

$$d = D - (2 \cdot a + 2 \cdot b) \quad (\text{mm})$$

siendo,

d	Distancia libre entre los palpadores en mm
D	Ancho de la viga en mm
a	Diámetro de la perforación necesaria para introducir el transductor, 6 mm
b	Separación mínima de la perforación con la superficie de la pieza, 30 mm

Con todo ello resulta que la separación mínima entre los transductores es:

$$d = D - (2 \cdot 6 + 2 \cdot 30) = \mathbf{D - 72 \text{ (mm)}}$$

Con estas limitaciones debe ensayarse la funcionalidad de la técnica para pequeñas separaciones. Se plantea realizar una campaña de ensayos a partir de medidas interiores para determinar la distancia mínima a la que deben situarse los palpadores para obtener unos resultados fiables. La distancia obtenida repercutirá, en la escuadría de las vigas de ensayo limitando el campo de inspección dentro de la tipología de los forjados con entrevigado cuajado.

##### VI.4.1.2.1. Ensayos realizados

Se han preparado dos vigas en las que se han marcado varias secciones sobre las que se han estudiado sus velocidades perpendiculares a la fibra (velocidades normales). En estas secciones se ha ido disminuyendo paulatinamente la separación entre las perforaciones.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las Tablas VI.57 y VI.58.



**Tabla VI.57.** Mediciones interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas sobre la Viga 1 (Capítulo V.4.3.2) reduciendo la separación entre las perforaciones.

DISTANCIA ENTRE PALPADORES (mm)	TIEMPO ( $\mu$ s)	TIEMPO CORREGIDO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD NORMAL (m/s)
110 (exterior)	137,0	76,2	1443,56
70 (interior)	108,0	47,2	1483,05
60 (interior)	101,0	40,2	1492,53
52 (interior)	97,0	36,2	1436,46
42 (interior)	95,0	34,2	<b>1228,07</b>
28 (interior)	85,0	24,2	<b>1157,02</b>

**Tabla VI.58.** Mediciones interiores perpendiculares (normales) a la fibra realizadas sobre la Viga 2 (Capítulo V.4.3.2) reduciendo la separación entre las perforaciones.

DISTANCIA ENTRE PALPADORES (mm)	TIEMPO ( $\mu$ s)	TIEMPO CORREGIDO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD NORMAL (m/s)
135 (exterior)	135,5	74,5	1812,08
80 (interior)	104,7	43,9	1822,32
70 (interior)	97,2	36,4	1923,07
60 (interior)	93,5	32,7	1834,86
52 (interior)	89,1	28,3	1837,45
43 (interior)	88,5	27,7	<b>1552,34</b>
32 (interior)	85,5	24,7	<b>1295,54</b>
23 (interior)	80,2	19,4	<b>1185,56</b>
15 (interior)	72	11,2	<b>1339,28</b>

Los resultados mostrados en las Tablas VI.57 y VI.58 reflejan que las mediciones realizadas, cuando la separación entre los transductores es superior a 40 mm, conducen a velocidades similares dentro de la misma viga. No obstante, cuando la separación de los palpadores es inferior a 40 mm, la fiabilidad de la medida es cuestionable por la dispersión de los resultados que se produce. Asimismo, la toma de medidas con tan escasa separación resulta especialmente difícil.

#### **VI.4.1.2.2. Estudio del error cometido**

En todo ensayo debe tenerse en cuenta el rango de error cometido en una medición. En un ensayo de ultrasonidos este error se traduce en una variabilidad entre dos mediciones distintas de un mismo elemento. Factores extrínsecos del procedimiento operatorio como el acople de los palpadores o la presión ejercida sobre el elemento en cuestión, condicionan los resultados que se obtienen en cada medición.

Para los casos aportados la variabilidad de las medidas ha oscilado entre  $\pm 1,5 \mu$ s, es decir, un intervalo absoluto de  $3 \mu$ s, cuando la separación entre los transductores era superior a 40 mm, y hasta  $\pm 5 \mu$ s con un intervalo absoluto de  $10 \mu$ s, cuando la separación de los palpadores era inferior a 40 mm. Los resultados aportados en las Tablas VI.68 y VI.69 se corresponden con el valor medio de todas las mediciones realizadas.

La influencia de esta variabilidad en las mediciones sobre la velocidad de ultrasonidos está determinada por la escuadría de las piezas, repercutiendo en mayor medida sobre las piezas de pequeña escuadría. Para mostrar la influencia de este error sobre los resultados de una medición se ha realizado un estudio teórico donde se ilustra la influencia de un error absoluto de tiempo de  $3 \mu$ s sobre las velocidades de ultrasonidos dependiendo de la separación entre transductores o escuadría de la sección de la pieza.

Los resultados se muestran a continuación en las Tablas VI.59 y VI.60.

**Tabla VI.59.** Estudio de la influencia de una variabilidad de 3  $\mu$ s de tiempo sobre las velocidades de ultrasonidos dependiendo de la escuadría de la sección o separación entre los transductores. Velocidad normal teórica supuesta de 1800 m/s.

SEPARACION TRANSDUCTORES (mm)	TIEMPO TEÓRICO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD TEÓRICA (m/s)	TIEMPO ( $\mu$ s) (variabilidad 3 $\mu$ s)	VELOCIDAD (m/s) (variabilidad 3 $\mu$ s)	DIFERENCIA ENTRE VELOCIDADES (m/s)
80	44,44+60,8	1800	44,44+60,8+3	1686,18	113,81
70	38,88+60,8	1800	38,88+60,8+3	1671,08	128,91
60	33,33+60,8	1800	33,33+60,8+3	1651,37	148,62
50	27,77+60,8	1800	27,77+60,8+3	1624,54	175,45
40	22,22+60,8	1800	22,22+60,8+3	1585,90	214,09
30	16,66+60,8	1800	16,66+60,8+3	1525,42	274,57
20	11,11+60,8	1800	11,11+60,8+3	1417,32	382,67
15	8,33+60,8	1800	8,33+60,8+3	1323,52	476,47

**Tabla VI.60.** Estudio de la influencia de una variabilidad de 3  $\mu$ s de tiempo sobre las velocidades de ultrasonidos dependiendo de la escuadría de la sección o separación entre los transductores. Velocidad normal teórica supuesta de 1500 m/s.

SEPARACION TRANSDUCTORES (mm)	TIEMPO TEÓRICO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD TEÓRICA (m/s)	TIEMPO ( $\mu$ s) (variabilidad 3 $\mu$ s)	VELOCIDAD (m/s) (variabilidad 3 $\mu$ s)	DIFERENCIA ENTRE VELOCIDADES (m/s)
80	53,33+60,8	1500	53,33+60,8+3	1420,11	79,88
70	46,66+60,8	1500	46,66+60,8+3	1409,39	90,60
60	40,00+60,8	1500	40,00+60,8+3	1395,34	104,65
50	33,33+60,8	1500	33,33+60,8+3	1376,14	123,85
40	26,66+60,8	1500	26,66+60,8+3	1348,31	151,68
30	20,00+60,8	1500	20,00+60,8+3	1304,34	195,65
20	13,33+60,8	1500	13,33+60,8+3	1224,48	275,51
15	10,00+60,8	1500	10,00+60,8+3	1153,84	346,15

Matemáticamente, como se puede observar en los ejemplos expuestos, a medida que disminuye la separación entre los transductores, la influencia de las oscilaciones de las mediciones sobre las velocidades es mayor. Estos resultados pueden inducir a error pudiendo ser interpretados como una pérdida de densidad del elemento.

Conforme a lo expuesto en el Capítulo VI.2.2., la pérdida de densidad en un determinado elemento de madera se detecta a través de una bajada brusca en su velocidad normal de ultrasonidos. Este hecho implica que, en las piezas pequeñas donde las oscilaciones posibles en las velocidades de ultrasonidos son significativas, esta variabilidad puede ser interpretada indistintamente como la desviación propia de la técnica o cómo una pérdida de densidad interna de la pieza pudiendo incurrir en error. Este hecho supone una limitación para la aplicación de la técnica impuesta por la escuadría de los elementos a inspeccionar.

### VI.4.1.3. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LOS NUEVOS PALPADORES DE ULTRASONIDOS

La aplicación de los nuevos transductores ultrasonidos requiere tener en cuenta las correcciones y/o limitaciones siguientes:

- **Factor de corrección del tiempo de ultrasonidos medido:**

Todos los tiempos medidos a través del aparato de ultrasonidos, que nos permiten obtener la velocidad de ultrasonidos, deben ser corregidos restando el retardo del nuevo palpador, 60,8  $\mu$ s.

- **Escuadría mínima de viga requerido para la medición de velocidades en la dirección perpendicular a la fibra:**

Debido a las oscilaciones que pueden producirse en las mediciones de la velocidad de ultrasonidos debe limitarse el ancho mínimo de la viga para las mediciones realizadas en dirección perpendicular a la fibra. La variabilidad producida en una medición tiene un mayor efecto sobre las piezas pequeñas pudiendo ser interpretada como una pérdida de densidad. Por esta razón, se limita la aplicabilidad de la técnica a vigas con un ancho mínimo de sección de 12 cm. La inspección de vigas de menor escuadría se reserva para otros métodos de inspección como puede ser el resistógrafo.

- **Nuevos valores de criterios de diagnóstico:**

Los valores de diagnóstico aportados en la inspección de forjados tradicionales son:

- $V_N > 1200$  m/s  $\rightarrow$  Madera sana.
- $1200$  m/s  $> V_N > 600$  m/s  $\rightarrow$  Inicio de deterioro (pérdida de densidad entre 0-30%).
- $V_N < 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$ .

Estos valores de velocidad se obtendrán una vez que se apliquen los factores de corrección aportados. No obstante, si no se aplican dichos factores deben obtenerse unos valores de tiempo, dependiendo de la separación entre los palpadores, dentro de los intervalos siguientes:

Separación entre transductores: 5 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro	Madera deteriorada
$< 102,4 \mu$ s	$102,4 - 144,1 \mu$ s	$> 144,1 \mu$ s

Separación entre transductores: 6 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro	Madera deteriorada
$< 110,8 \mu$ s	$110,8 - 160,8 \mu$ s	$> 160,8 \mu$ s

Separación entre transductores: 7 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro	Madera deteriorada
$< 119,1 \mu$ s	$119,1 - 177,4 \mu$ s	$> 177,4 \mu$ s

Separación entre transductores: 8 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro	Madera deteriorada
$< 127,4 \mu$ s	$127,4 - 194,13 \mu$ s	$> 194,13 \mu$ s

### VI.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN

Hasta ahora la inspección de las vigas de madera que forman parte de los forjados con entrevigado cuajado ha estado sujeta a un levantamiento completo del forjado que permitiese descubrir sus caras laterales y superior y, de esta forma, determinar la existencia o no de deterioro y el alcance del mismo.

En este trabajo se pretende desarrollar una metodología de inspección cuasi no destructiva de aplicación a este tipo de forjados, de manera que se pueda establecer un diagnóstico sobre su estado de conservación sin necesidad de realizar un levantamiento completo del forjado. De esta forma los objetivos principales son:

- Detectar estados de deterioro y su avance.
- Estimar la resistencia de las piezas.

#### VI.4.2.1. ESTUDIOS PREVIOS DE LA EDIFICACIÓN

Antes de acometer los ensayos en obra se realizará un estudio previo de la edificación. En este estudio se requerirá la siguiente información:

a) Fecha de construcción de la edificación. A partir de este dato es posible conocer la edad de los materiales, en este caso, la madera.

b) Descripción gráfica. Se realizará un levantamiento planimétrico y reportaje fotográfico del inmueble.

c) Análisis del sistema constructivo. Se dibujará la planta del forjado indicando las líneas de carga, la orientación y separación entre las viguetas, su longitud, ancho de la sección que queda vista. El ancho de la sección de las viguetas que queda vista permite hacer una estimación sobre la escuadría de las viguetas.

d) Descripción de las lesiones. Se realizará un estudio de las lesiones de la sección de las viguetas de madera que quedan vistas.

#### VI.4.2.2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA INSPECCIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

Para poder acometer las labores de inspección de un forjado de entrevigado cuajado mediante ensayos de ultrasonidos es necesario que la sección de sus viguetas cumpla con las condiciones determinadas en el Capítulo VI.4.1.3. En este capítulo se limita, según los ensayos realizados, el ancho mínimo de la viga, para las mediciones realizadas en la dirección perpendicular a la fibra, a 10 cm. La inspección de vigas de menor escuadría se realizará por otros métodos de inspección como puede ser el resistógrafo.

#### VI.4.2.3. PLAN DE ENSAYOS

La pudrición de las viguetas en los forjados de entrevigado cuajado está condicionada por el nivel de humedad del relleno del entrevigado del forjado afectando principalmente a la zona superior de su sección. No obstante, la localización del mapa de deterioro dentro del forjado no sigue un patrón predeterminado. El deterioro puede afectar, no solo a las zonas de los empotramientos, sino a toda la longitud de la viga. Por ello, en cada viga se marcarán 4 secciones de ensayo distribuidas uniformemente en toda su longitud. En cada sección se medirá:

- Contenido de humedad.
- Velocidad de ultrasonidos.

#### VI.4.2.3.1. Medición del contenido de humedad

La medición del contenido de humedad de una madera nos puede aportar información sobre el estado de conservación del elemento inspeccionado. El deterioro producido en la madera suele ir asociado a incrementos de humedad que favorecen las condiciones de pudrición de un elemento. Por ello, en cada una de las secciones seleccionadas se medirá el contenido de humedad tanto exterior como en el interior del elemento. Para la medición del contenido de humedad interior en la pieza se practicará una perforación en cada una de las secciones de un diámetro de 6 mm coincidiendo con el diámetro del nuevo palpador de ultrasonidos.

#### VI.4.2.3.2. Ensayos de ultrasonidos

Se realizarán ensayos de ultrasonidos en las secciones exterior e interior de las piezas.

##### ■ Mediciones exteriores:

Mediciones perpendiculares a la fibra (normales): Las mediciones perpendiculares a la fibra (normales) tienen como finalidad la estimación del estado de conservación y/o nivel de deterioro de una estructura. La medición de la velocidad perpendicular a la fibra,  $V_N$  en la sección exterior de las vigas de los forjados de entrevigado cuajado permitirá determinar el rango de velocidades normales de la madera sana de dicha estructura (Figura VI.93).

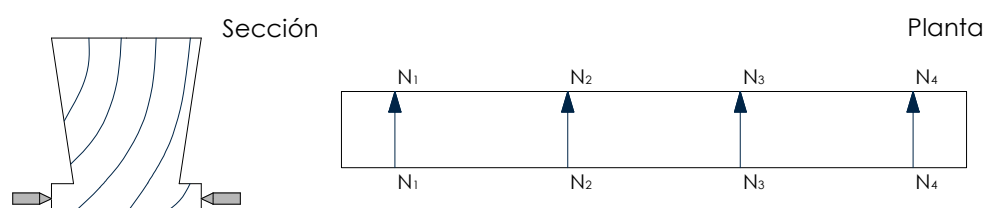


Figura VI.93. Mediciones perpendiculares a la fibra (normales) realizadas en la sección exterior de las vigas.

Medidas longitudinales cruzadas: A partir de las medidas longitudinales cruzadas se determina la velocidad en el sentido longitudinal a la fibra,  $V_L$  (Figura VI.94).

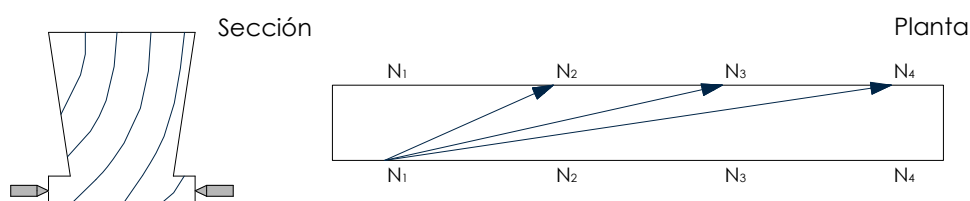


Figura VI.94. Mediciones longitudinales cruzadas realizadas en la sección exterior de las vigas.

Las velocidades longitudinales,  $V_L$ , permiten estimar, a partir de las correlaciones establecidas en el Capítulo VI.2.1.1.3 con el módulo resistente (MOR) y el módulo de elasticidad estático (MOE), la clase resistente de la madera que compone la estructura.

Al realizar las mediciones en las zonas no empotradas de las vigas nos aseguramos que la madera está sana pudiendo conocer su calidad como material estructural.

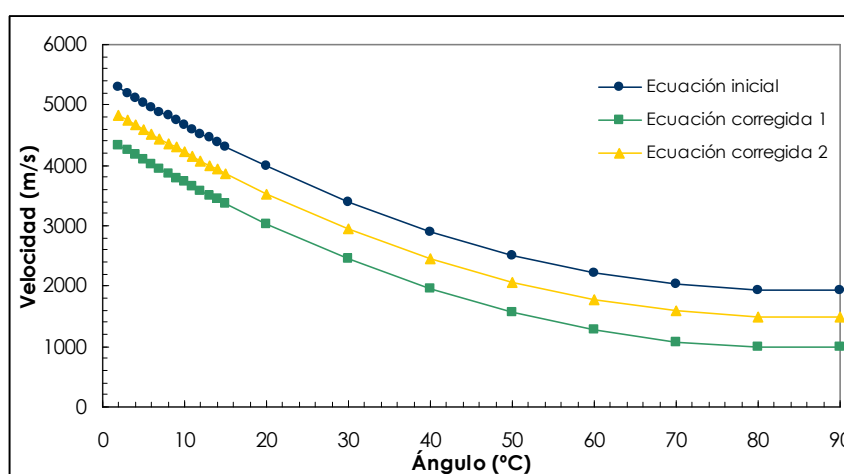
La obtención de la velocidad longitudinal se realiza a partir de la ecuación establecida por Acuña et al. en el año 2006 y recogida en el Estado del Conocimiento. En esta ecuación se relaciona la velocidad de ultrasonidos con el ángulo de dirección de la fibra para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y viene dada por la siguiente expresión:

$$V = 0,488a^2 - 83,04a + 5446,8$$

siendo

- a      Ángulo en grados (°C) de los palpadores con respecto a la dirección de la fibra  
V      Velocidad de ultrasonidos en m/s para un ángulo a (°C) dado

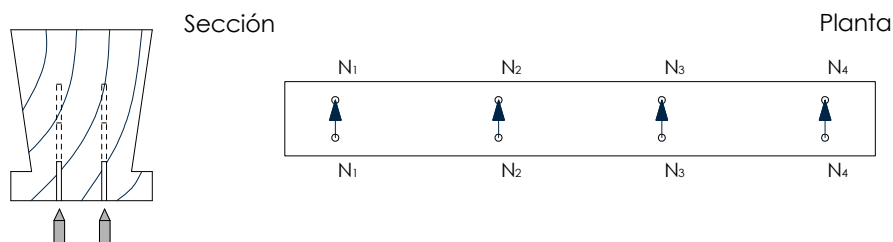
Para aplicar esta ecuación debe corregirse, en cada caso, el valor del término independiente. Este término representa el valor de la velocidad longitudinal ( $\alpha=0$ ). Así, conocidos los valores de V y a es posible determinar el valor de la velocidad longitudinal ( $\alpha=0$ ) que corresponde a la pieza estudiada (Figura VI.95).



**Figura VI.95.** Corrección de los valores de la ecuación inicial dada por Acuña et al. en 2006 para la obtención del valor de velocidad de ultrasonidos para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) en función del ángulo de inclinación de la fibra.

### ■ Mediciones interiores:

Mediciones perpendiculares a la fibra (normales): Las mediciones perpendiculares a la fibra realizadas en el interior de las piezas permitirán determinar su estado de conservación y/o nivel de deterioro. Asimismo, estas mediciones permitirán determinar la sección sana residual de cada pieza a medida que se aumenta la profundidad de la medición desde 3, 6 a 9 cm desde la superficie (Figura VI.96).



**Figura VI.96.** Mediciones perpendiculares a la fibra (normales) realizadas en las secciones interiores de las vigas. En estas mediciones se aumenta paulatinamente la profundidad de la inspección desde 3, 6 a 9 cm de profundidad.

Los datos resultantes de estos ensayos se recogerán en las fichas mostradas a continuación.

#### VI.4.2.4. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE VIGAS A ENSAYAR. PLAN DE MUESTREO

Una vez determinado el Plan de Ensayos a realizar en las piezas de este tipo de forjados, una cuestión fundamental es establecer el número de vigas a ensayar.

Este número de vigas a ensayar compone lo que se denomina una muestra. De este modo, en el análisis estadístico, aunque no se puede tener certeza de que esta muestra sea representativa de una población, se puede atribuir un cierto grado de seguridad a los resultados obtenidos. Este grado de seguridad o confianza es lo que permite extrapolar los resultados al resto de elementos que componen el lote.

El número de vigas a ensayar dentro de un forjado vendrá determinado por el grado de seguridad o confianza requerido en los resultados de la inspección y en el tamaño del lote. La norma ISO 3443 de 1988 en su Parte 7 establece unos principios generales sobre criterios de aceptación basados en datos específicos y control estadístico.

Según esta norma la elección de un nivel de confianza, llamado Nivel de Calidad Aceptable (NCA) se realiza en función de la fiabilidad que se precise en la aplicación de los resultados obtenidos. A medida que reducimos el NCA, la posibilidad de que aparezca un valor diferente es menor. En esta norma se fijan 3 Niveles de Confianza Aceptables, 4, 6,5 y 10%. Para el caso que nos ocupa, se recomienda tomar un NCA 4%.

En cuanto a la división de las piezas en lotes, debe tenerse en cuenta que los lotes deben estar compuestos por elementos de similares características (situación, geometría,...). Por ello, el número de vigas que constituirán cada lote no tiene por qué ser equivalente. En cada caso dependerá de la definición física y funcional de las mismas (situación en la planta del edificio,...).

El tamaño de los lotes y de las muestras a ensayar en función del NCA se recoge en la Tabla VI.61.

**Tabla VI.61.** Muestreo estadístico según los valores de Nivel de Confianza Aceptable (NCA) de la norma ISO 3443:1988. Parte 7.

MUESTREO ESTADÍSTICO								
Tamaño del lote	Muestra 2 x n	Familia	NCA 4%		NCA 6,5%		NCA 10%	
			V	NV	V	NV	V	NV
3-15	1 x 3	Única	0	1	0	1	1	2
16-25	2 x 3	1ª familia	0	2	0	2	1	2
		2ª familia	1	2	1	2	1	2
26-50	2 x 5	1ª familia	0	2	0	2	0	3
		2ª familia	1	2	1	2	3	4
51-90	2 x 8	1ª familia	0	2	0	3	1	4
		2ª familia	1	2	3	4	4	5
91-150	2 x 13	1ª familia	0	3	1	4	2	5
		2ª familia	3	4	4	5	6	7
151-280	2 x 20	1ª familia	1	4	2	5	3	7
		2ª familia	4	5	6	7	8	9
281-500	2 x 32	1ª familia	2	5	3	7	5	9
		2ª familia	6	7	8	9	12	13

La información obtenida en la inspección de los elementos que componen la muestra será extrapolable al total del lote en función de que se cumplan las condiciones de Válido (V) o No Válido (NV) que se establecen en la Tabla VI.61. En esta tabla los números de Válido (V) o No Válido (NV) representan el número máximo de valores diferentes que pueden presentarse para extrapolar los resultados de la muestra a la totalidad de elementos que componen el lote.

Los ensayos deben realizarse sobre las unidades de la 1ª familia. En este procedimiento de análisis pueden aparecer las siguientes casuísticas:

- a) Si el número de unidades con valores diferentes o fuera de rango es igual o inferior que el valor indicado por V (Válido) se considera que el conjunto de elementos presenta los mismos valores.
- b) Si el número de unidades con valores diferentes o fuera de rango es igual o superior al valor indicado por NV (No válido) se considera que el conjunto de elementos no presenta los mismos valores, es decir, los resultados no son extrapolables. En este caso puede procederse modificando el NCA (a 6,5 o 10%) o inspeccionando el 100% de las restantes unidades para obtener las conclusiones que correspondan.
- c) Si el número de valores diferentes está comprendido entre los indicados por V/NV, se procederá a realizar los análisis sobre los elementos de la 2ª familia, pudiéndose presentar los siguientes casos:
  - i. Si el número total de valores diferentes (incluyendo los obtenidos en la 1ª familia) es igual o menor que el valor indicado V (Válido), se considera que el conjunto de elementos presenta también los mismos valores o características.
  - ii. Si el número total de valores diferentes (incluyendo los obtenidos en la 1ª familia) es igual o superior al valor indicado por NV (No válido), se considera que el conjunto de elementos no presenta los mismos valores que en la muestra.



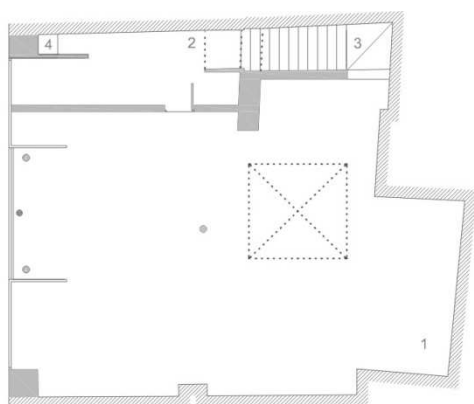
OBRA		Fecha inspección	
------	--	---------------------	--

### DATOS PREVIOS DE LA EDIFICACIÓN

#### DESCRIPCIÓN

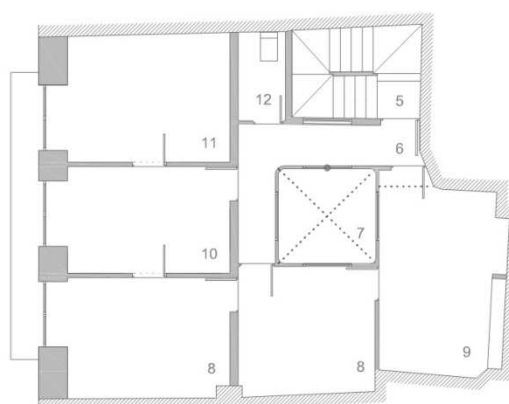
Situación			
Nº de plantas			
Sistema constructivo		Año construcción	

#### PLANIMETRÍA Y ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LA EDIFICACIÓN



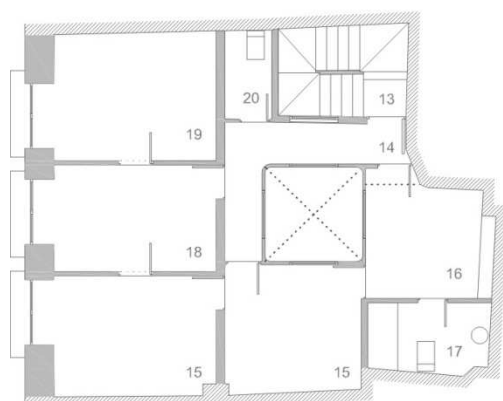
PLANTA BAJA

- 1 Local comercial
- 2 Vestíbulo de entrada
- 3 Comunicación
- 4 Armario de instalaciones



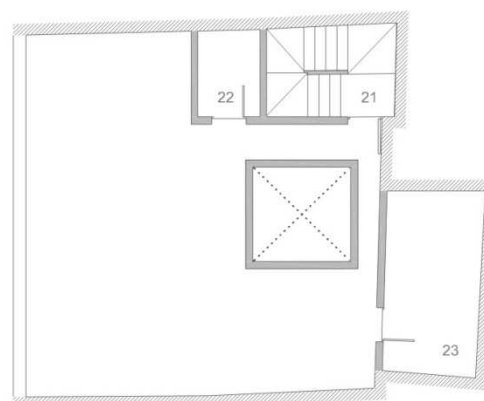
PLANTA PRIMERA / SEGUNDA

- 5 Comunicación
- 6 Vestíbulo de entrada
- 7 Patio
- 8 Sala de estar
- 9 Cocina
- 10 Dormitorio 1
- 11 Dormitorio 2
- 12 Baño



PLANTA TERCERA

- 13 Comunicación
- 14 Vestíbulo distribuidor
- 15 Sala de estar
- 16 Cocina
- 17 Baño 1
- 18 Dormitorio 1
- 19 Dormitorio 2
- 20 Baño 2



PLANTA CUBIERTA

- 21 Comunicación
- 22 Trastero 1
- 23 Trastero 2

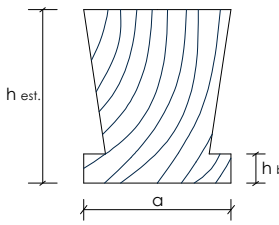


**DATOS PREVIOS DE LOS FORJADOS DE MADERA A INSPECCIONAR**

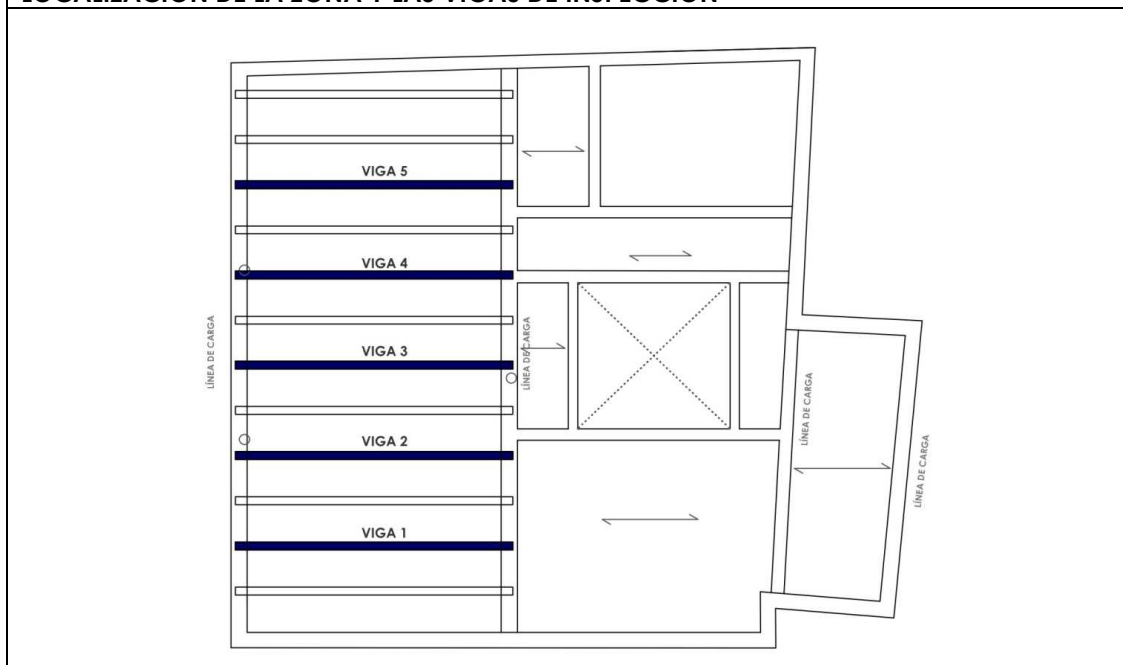
<b>LOCALIZACIÓN</b>	Planta nº
	Habitación
<b>LESIONES</b>	
<b>PLANIMETRÍA Y ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LESIONES</b>	
<div data-bbox="256 546 751 918"> </div> <div data-bbox="780 546 1276 918"> </div> <div data-bbox="240 1016 743 1391"> </div> <div data-bbox="780 1016 1289 1391"> </div> <p data-bbox="185 1912 927 1946">* Ejemplos de forjado de entrevigado cuajado con lesiones</p>	

## INSPECCIÓN DE LOS FORJADOS DE MADERA

### CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL FORJADO

Luz de las vigas (m)	4,00	Entrevigado (m)	0,50
	Escuadría (cm)	Inferior, a (cm)	12,50
		Altura base, h <sub>base</sub> (cm)	4,00
		Altura estimada, h <sub>est</sub> (cm)	18,00

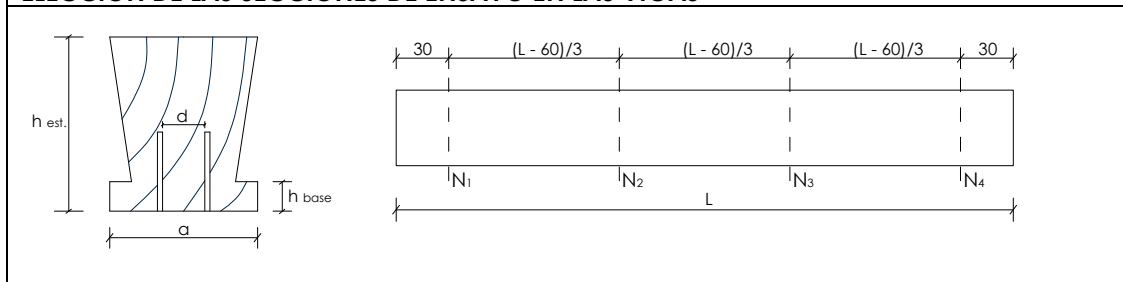
### LOCALIZACIÓN DE LA ZONA Y LAS VIGAS DE INSPECCIÓN



### MÉTODO DE INPECCIÓN APLICABLE

Separación libre máxima entre palpadores en cm, $d = (a - 7,20)$ :	5,30
Resistógrafo	
Ultrasonidos	X

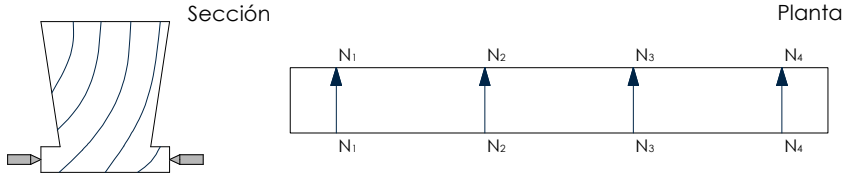
### ELECCIÓN DE LAS SECCIONES DE ENSAYO EN LAS VIGAS



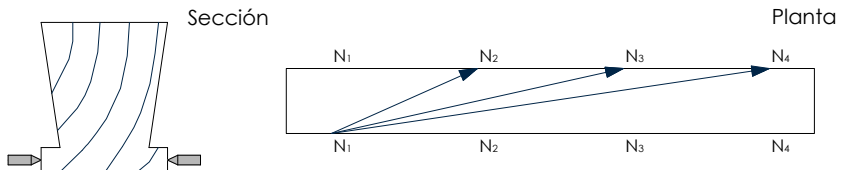
VIGA N° n

MEDIDAS EXTERIORES

Perpendiculares a la fibra (normales)

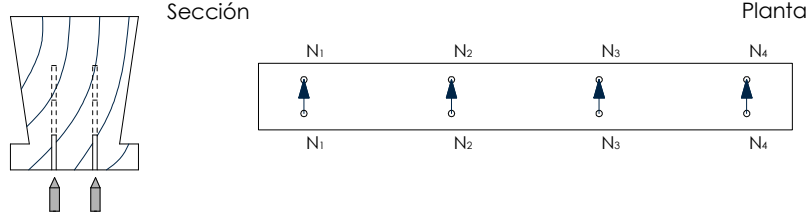
			
Sección	Separación(a)(m)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>			
N <sub>2</sub>			
N <sub>3</sub>			
N <sub>4</sub>			

Longitudinales cruzadas

			
Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>			
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>			
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>			

MEDIDAS INTERIORES

Perpendiculares a la fibra (normales)

				
Sección	Prof. (cm)	Separación ( m)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	3			
N <sub>1</sub>	6			
N <sub>1</sub>	9			
N <sub>2</sub>	3			
N <sub>2</sub>	6			
N <sub>2</sub>	9			
N <sub>3</sub>	3			
N <sub>3</sub>	6			
N <sub>3</sub>	9			
N <sub>4</sub>	3			
N <sub>4</sub>	6			
N <sub>4</sub>	9			

#### VI.4.2.5. LIMITACIONES DE APLICACIÓN EN OBRA

La metodología de inspección referida se encuentra actualmente en proceso de desarrollo. Los resultados obtenidos bajo condiciones de laboratorio pronostican un avance favorable para su aplicación in situ en obras de rehabilitación. No obstante, deben señalarse las limitaciones que ofrece hoy día la técnica derivada de la morfología de los equipos empleados:

- Diámetro de perforación elevado. El diámetro necesario para albergar los transductores de ultrasonidos es de 0,6 cm. Aunque se prevé en cada caso rellenar las perforaciones mediante tacos de madera debe trabajarse en la reducción del diámetro de los transductores para lograr reducir el diámetro de estas perforaciones. El objetivo es poder asimilar estas perforaciones a las realizadas con otros equipos de ensayo empleados actualmente como el resistógrafo, equipo que realiza una perforación en la viga de 0,3 cm.
- Oscilación en las mediciones. Aunque se consiguen mediciones estables debe mejorarse el acople o estudiar un método de aislamiento del fuste para facilitar su aplicación en obra.

Con todo ello, debe concluirse que en un futuro debe trabajarse en el perfeccionamiento de los equipos empleados. Es fundamental conseguir disminuir el diámetro de perforación de modo que pueda considerarse una metodología de inspección cuasi no destructiva.



## **VI.5. RESULTADOS SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS**

---

VI.5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS

VI.5.2. PUESTA EN OBRA Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS

## RESUMEN

Los resultados en este capítulo van dirigidos a ofrecer un sistema para el refuerzo y/o reparación de vigas de madera. Los resultados a continuación expuestos avanzan sobre el estudio de la eficacia estructural del sistema propuesto bajo diferentes solicitaciones: refuerzo de vigas en los apoyos (esfuerzos cortantes) y refuerzo de vigas en los centros de vano (momentos flectores).

Asimismo, se analiza la viabilidad de esta solución frente a otras soluciones actuales en el campo de la rehabilitación, mediante el análisis de su proceso constructivo de ejecución y su valoración económica.



### VI.5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS

Los resultados de los ensayos realizados con probetas reforzadas se recogen a continuación. Para estos ensayos se han empleado los siguientes lotes de probetas:

Refuerzo de los apoyos:

Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Ensayo
<i>Pinus Sylvestris</i> L	18	50x50x725	Cortante
<i>Pinus Nigra</i> Arnold	13	50x50x725	Cortante

Refuerzo de los centros de vano:

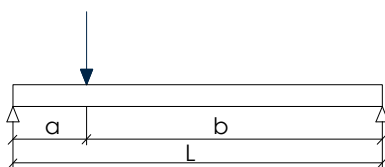
Especie	Nº de probetas	Dimensiones (mm <sup>3</sup> )	Ensayo
<i>Pinus Sylvestris</i> L	10	45x45x900	Flexión
<i>Pinus Sylvestris</i> L	5	50x50x1000	Flexión

En estas probetas se han ensayado refuerzos de distintas longitudes y 1 ó 2 capas de fibra de vidrio, respectivamente.

#### VI.5.1.1. Refuerzos a cortante. Refuerzos de los apoyos

Se ha realizado un ensayo de cortante empleando la metodología aplicada al ensayo de placas alveolares y viguetas de hormigón. Con este ensayo se pretende conocer la resistencia a cortante de las probetas de madera reforzadas según el método "a" descrito en el anexo J de la norma UNE EN 1168:2005.

Según este método para estimar la resistencia a cortante debe aplicarse una carga puntual vertical y hacia abajo en la viga a ensayar a una distancia 2,5 h del apoyo. Un esquema representativo del ensayo es el siguiente (Figura VI.97):



**Figura VI.97.** Metodología de ensayo a cortante según UNE EN 1168:2005.

Para el ensayo definido, el cortante máximo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{\max} = \frac{P \cdot b}{L} = \frac{P \cdot (L - a)}{L}$$

siendo;

- P Carga total aplicada en Kilonewtons, kN.
- L Longitud entre apoyos de la viga en metros, m.
- a Distancia entre el punto de aplicación de la carga y el apoyo más cercano en metros ( $a = 2,5 h$ ), m.
- h Canto de la viga en metros, m.

Se han ensayado varios lotes de probetas a cortante variando la longitud de los refuerzos empleados (175, 215 y 275 mm) y el número de capas de fibra de vidrio que componen los mismos (una o dos).

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

- Refuerzos compuestos por una capa de fibra de vidrio:

Los refuerzos con una capa de fibra de vidrio se han ensayado sobre probetas de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Los resultados obtenidos en los ensayos se recogen en la Tabla VI.62.

**Tabla VI.62.** Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por una capa de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables.

Nº PROBETA	LONGITUD REFUERZO / ANCLAJE (mm)	CARGA ROTURA (KN)	FLECHA (mm)	CORTANTE MAX. (KN)	EFICACIA <sup>1</sup>
Testigo <sup>2</sup> 1	--	11,75	14,62	9,40	--
Testigo 2	--	12,41	16,67	9,92	--
Testigo 3	--	13,66	16,63	10,92	--
Valor medio		12,60	15,97	10,08	--
1	175/0	10,74	12,36	8,59	0,85
2	175/0 *	10,71	11,54	8,56	0,84
3	175/0	10,68	12,34	8,54	0,84
Valor medio		10,71	12,08	8,56	0,84
1	215/40	8,77	11,82	7,01	0,69
2	215/40 *	12,96	12,87	9,30	0,92
3	215/40	11,63	14,59	7,55	0,75
Valor medio		11,12	13,09	7,95	0,78
Modific. <sup>3</sup> 1	Longitud ranura: 275	7,49	11,45	5,99	0,59
Modific. 2	Longitud ranura: 275	6,46	10,58	5,16	0,51
Valor medio		6,97	11,01	5,57	0,55
1	275/100	13,46	16,08	10,76	1,06
2	275/100 *	10,92	12,21	8,73	0,86
3	275/100	9,44	17,04	10,36	1,02
Valor medio		11,27	14,29	9,01	0,98

\* Ver Figura V.61. Capítulo V.5.3.

<sup>1</sup> Eficacia: Relación entre la resistencia obtenida en las probetas reforzadas y las probetas sanas.

<sup>2</sup> Probetas testigo: probetas sanas utilizadas como referencia para medir la eficacia estructural del refuerzo.

<sup>3</sup> Probetas modificadas: probetas ranuradas y sin placa de refuerzo utilizadas para medir la bajada de resistencia producida por el ranurado.

- Refuerzos compuestos por dos capas de fibra de vidrio:

Los refuerzos con dos capas de fibra de vidrio se han ensayado sobre probetas de las especies pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) y pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Los resultados obtenidos se recogen en las Tablas VI.63 y VI.64.

**Tabla VI.63.** Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

Nº PROBETA	LONGITUD REFUERZO / ANCLAJE (mm)	CARGA ROTURA (KN)	FLECHA (mm)	CORTANTE MAX (KN)	EFICACIA
Testigo 1	--	12,57	--	10,05	--
Testigo 2	--	11,45	16,51	9,16	--
Testigo 3	--	13,39	17,38	10,71	--
Valor medio		12,47	16,94	9,97	--
1	175/0	10,18	22,1	8,14	0,81
2	175/0 *	10,37	13,33	8,29	0,83
3	175/0	7,35	12,15	5,88	0,58
Valor medio		9,30	15,86	7,43	0,74
1	215/40	9,55	11,95	7,64	0,76
2	215/40 *	11,4	16,33	9,12	0,91
3	215/40	8,58	7,04	6,86	0,68
Valor medio		9,84	11,77	7,87	0,78
1	275/100	13,54		10,83	1,08
2	275/100 *	13,07	19,66	10,45	1,04
3	275/100	13,68	18,24	10,94	1,09
Valor medio		13,43	18,95	10,74	1,07

\* Ver Figura V.61. Capítulo V.5.3.

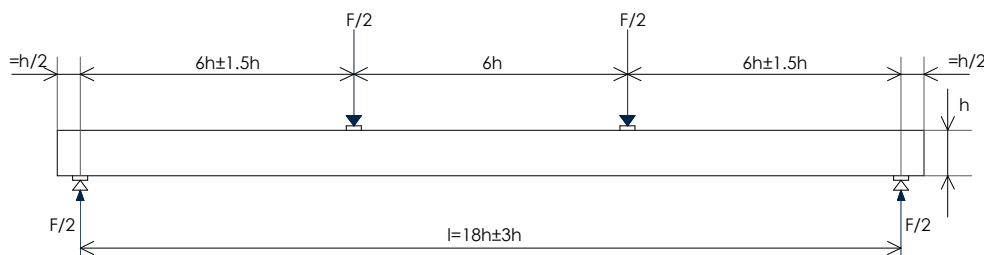
**Tabla VI.64.** Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

Nº PROBETA	LONGITUD REFUERZO / ANCLAJE (mm)	CARGA ROTURA (KN)	FLECHA (mm)	CORTANTE MAX (KN)	EFICACIA
Testigo 1	--	11,75	14,62	9,40	--
Testigo 2	--	12,41	16,67	9,92	--
Testigo 3	--	13,66	16,63	10,92	--
Valor medio		12,60	15,97	10,08	--
Modific. 1	Longitud ranura: 275	7,49	11,45	5,99	0,59
Modific. 2	Longitud ranura: 275	6,46	10,58	5,16	0,51
Valor medio		6,97	11,01	5,57	0,55
1	275 / 100	10,60	11,45	8,48	0,84
2	275 / 100 *	10,60	16,42	8,48	0,84
3	275 / 100	13,50	18,50	10,80	1,07
4	275 / 100	11,47	16,58	9,17	0,90
Valor medio		11,54	15,73	9,23	0,91

\* Ver Figura V.61. Capítulo V.5.3.

### VI.5.1.2. Refuerzos a flexión. Refuerzos de los centros de vano

Para determinar la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad de las probetas bajo estas nuevas condiciones de refuerzo se ha realizado el ensayo a flexión definido en la norma UNE EN 408. El procedimiento operatorio de este ensayo aplica dos cargas sobre la probeta simplemente apoyada según el siguiente esquema (Figura VI.98):



**Figura VI.98.** Dispositivo de ensayo según norma UNE-EN 408:2011 para la determinación de la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad.

La resistencia a flexión  $f_m$ , se calcula mediante la ecuación:

$$f_m = \frac{aF_{\max}}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en milímetros, mm.
- $F_{\max}$  Carga de rotura de la probeta en kilonewtons, KN .
- W Módulo resistente de la pieza en milímetros elevados a la tercera potencia, mm<sup>3</sup>.

Se han ensayado dos lotes de probetas de dimensiones 45x45x900 mm<sup>3</sup> y 50x50x1000 mm<sup>3</sup>, respectivamente, variando la longitud de los refuerzos empleados en cada caso. De este modo, para poder comparar los resultados extraídos y analizar la eficacia obtenida en ambos lotes el Código Técnico (CTE) refiere la resistencia a flexión de la madera a piezas con una altura de sección (h) de 150 mm a partir de la siguiente expresión:

$$k_h = (150/h)^{0.2} \leq 1,3$$

siendo;

h canto en flexión en milímetros, mm.

Asimismo, el módulo de elasticidad global  $E_{m,g}$  se determina a partir de la siguiente expresión:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right] (\text{N/mm}^2)$$

siendo;

- a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en milímetros, mm.
- l Luz en flexión en milímetros, mm.
- $F_2 - F_1$  Incremento de carga en newtons, N, en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.
- $w_2 - w_1$  Incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

- Refuerzos compuestos por dos capas de fibra de vidrio:

Los refuerzos con dos capas de fibra de vidrio se han ensayado sobre probetas de la especie pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). Los ensayos se han realizado sobre probetas de dimensiones 45x45x900 mm<sup>3</sup> y 50x50x1000 mm<sup>3</sup>. Los resultados obtenidos se recogen en las Tablas VI.65 y VI.66.

**Tabla VI.65.** Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Probetas de dimensiones 45x45x900 mm<sup>3</sup>.

Nº PROBETA	LONGITUD REFUERZO / ANCLAJE (mm)	MÓDULO ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN, C <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	EFICACIA (RIGIDEZ)	EFICACIA (RESISTENCIA A FLEXIÓN)
Testigo 1	--	8764,97	69,82	--	--
Modific. 1	Longitud ranura: 470	8135,1	43,16	0,92	0,61
1	470 / 100	9625,50	88,98	1,10	1,27
2	470 / 100	9532,35	86,32	1,09	1,23
Valor medio		9578,92	87,65	1,10	1,25
Modific. 1	Longitud ranura: 570	7783,20	30,81	0,88	0,44
1	570 / 150	7493,4	58,17	0,85	0,83
2	570 / 150	9119,82	73,67	1,04	1,05
Valor medio		8306,61	65,92	0,94	0,94
Modific. 1	Longitud ranura: 670	7886,7	44,04	0,89	0,63
1	670 / 200	8155,8	61,72	0,93	0,88
2	670 / 200	10148,91	86,51	1,15	1,23
Valor medio		9152,35	74,11	1,04	1,05

**Tabla VI.66.** Resultados de las probetas reforzadas con placas compuestas por dos capas de fibra de vidrio. Longitudes de los refuerzos variables. Probetas de dimensiones 50x50x1000 mm<sup>3</sup>.

Nº PROBETA	LONGITUD REFUERZO / ANCLAJE (mm)	MÓDULO ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN, c <sup>5</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	EFICACIA (RIGIDEZ)	EFICACIA (RESISTENCIA A FLEXIÓN)
Testigo 1	--	8764,97	54,88	--	--
Modific. 1	Longitud ranura: 900	9315,00	35,77	1,06	0,65
1	900 / 300	9190,80	50,92	1,05	0,92
2	900 / 300	8776,80	71,46	1,00	1,30
3	900 / 300	9723,08	67,42	1,11	1,22
4	900 / 300	7866,00	48,93	0,89	0,89
Valor medio		8889,17	59,68	1,01	1,08

<sup>4</sup> Resistencia a flexión referida a una altura de sección de 150 mm aplicando el coeficiente K<sub>n</sub> definido en el Código Técnico de la Edificación (CTE).

<sup>5</sup> Resistencia a flexión referida a una altura de sección de 150 mm aplicando el coeficiente K<sub>n</sub> definido en el Código Técnico de la Edificación (CTE).

### Discusión de resultados y conclusiones:

1. Se ha estudiado el comportamiento estructural bajo diferentes solicitaciones de los refuerzos fabricados a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Para ello, se ha definido el coeficiente de eficacia en dos situaciones:

*Resistencia.* El coeficiente de eficacia en resistencia relaciona la resistencia máxima, tanto en cortante como en flexión, de una probeta reforzada en referencia a una probeta sana.

*Rigidez.* El coeficiente de eficacia en rigidez relaciona el módulo de elasticidad en flexión de una probeta reforzada en referencia a una probeta sana.

2. Los resultados obtenidos en los ensayos de cortante realizados permiten concluir que la eficacia de las probetas reforzadas con respecto a las probetas testigo varía en función de la longitud de los refuerzos empleados.

*a. Refuerzos compuestos por una capa de fibra de vidrio:*

- Refuerzos cortos (175 mm, longitud de anclaje 0 mm): eficacia de 0,84. El procedimiento operatorio del ensayo demuestra que los refuerzos cortos resultan inefectivos. Los resultados obtenidos muestran que la modificación de las condiciones de las probetas (ranurado y ejecución del refuerzo) produce una bajada en la resistencia a cortante de las mismas como resultado de un refuerzo inadecuado.

- Refuerzos intermedios (215 mm, longitud de anclaje 40 mm): eficacia de 0,78. Los resultados obtenidos muestran una bajada importante de la eficacia en resistencia de estas probetas con respecto a las probetas sanas. Se demuestra que la longitud de los refuerzos resulta insuficiente por carecer del anclaje adecuado.

- Refuerzos largos (275 mm, longitud de anclaje 100 mm): eficacia de 0,98. Los refuerzos más largos resultan ser los más efectivos. Su longitud hace que estos refuerzos actúen alcanzando unos valores de resistencia en las probetas similares a los obtenidos en las probetas sanas.

*b. Refuerzos compuestos por dos capas de fibra de vidrio:*

- Refuerzos cortos (175 mm, longitud de anclaje 0 mm): eficacia de 0,74. Los refuerzos cortos resultan, nuevamente, inefectivos para el procedimiento operatorio del ensayo. No obstante, en este caso, los resultados obtenidos muestran que la modificación de las condiciones de las probetas (ranurado y ejecución del refuerzo) causan una bajada sobre la resistencia de las probetas sin que el refuerzo actúe.

- Refuerzos intermedios (215 mm, longitud de anclaje 40 mm): eficacia de 0,78. Los refuerzos intermedios ejecutados con dos capas de fibra de vidrio muestran una eficacia idéntica a la obtenida con los refuerzos realizados con una sola capa de fibra de vidrio. Se muestra una bajada importante de la resistencia de estas probetas con respecto a las probetas sanas por lo que se ratifica que la longitud de los refuerzos resulta insuficiente.

- Refuerzos largos (275 mm, longitud de anclaje 100 mm): eficacia de 1,07. Los refuerzos más largos resultan ser los más eficaces. La longitud de estos refuerzos compuestos por dos capas de fibra de vidrio permite alcanzar unos valores de resistencia superiores a los valores obtenidos con los refuerzos de la misma longitud compuestos por una sola capa de fibra.

3. Los resultados obtenidos en los ensayos de flexión realizados permiten concluir que la eficacia de las probetas reforzadas con respecto a las probetas testigo varía en función de la longitud de los refuerzos.

a. *Refuerzos compuestos por dos capas de fibra de vidrio:*

Probetas de 45x45x900 mm:

- Refuerzos cortos (470 mm, longitud de anclaje 100 mm a cada lado): eficacia en rigidez 1,10 y en resistencia a flexión 1,25.

- Refuerzos intermedios (570 mm, longitud de anclaje 150 mm a cada lado): eficacia en rigidez y en resistencia a flexión 0,94.

- Refuerzos largos (670 mm, longitud de anclaje 200 mm a cada lado): eficacia en rigidez 1,04 y en resistencia a flexión 1,05.

Probetas de 50x50x1000 mm:

- Refuerzos largos (900mm, longitud de anclaje 300 mm a cada lado): eficacia en rigidez 1,01 y en resistencia a flexión 1,08.

El análisis de estos valores de eficacia señala que todas las soluciones aportadas arrojan unos rendimientos aceptables. No obstante, para las situaciones analizadas, se manifiesta que los refuerzos más cortos permiten obtener coeficientes de eficacia más elevados tanto en resistencia como en rigidez. La alteración realizada en las probetas para el ensayo de los refuerzos más largos (ranurado y ejecución del refuerzo) coincide en longitud con los puntos de apoyo donde se aplican las reacciones siendo una sección débil dentro de las piezas no cubiertas por el refuerzo sino debilitadas por el ranurado.

4. Los resultados de los ensayos realizados permiten concluir:

- a. Los refuerzos realizados a partir de fibra de vidrio y resina de poliéster permiten alcanzar una eficacia estructural de las probetas reparadas con respecto a las probetas sanas próxima o superior a la unidad por lo que se muestran como una buena alternativa a las reparaciones y/o refuerzos realizados con perfiles de acero o madera.
- b. Es necesario hacer un estudio sobre la longitud de anclaje necesaria para conseguir un máximo aprovechamiento. La experiencia práctica de los ensayos realizados arroja las siguientes conclusiones:

Ensayos de cortante: La longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2h (100 mm), medida desde el punto de aplicación de la carga.

Ensayos de flexión: La longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2,2h a ambos lados (100 mm), medida desde el punto de aplicación de la carga.

Ambos ensayos no corresponden a situaciones de carga reales. No obstante, los diagramas de esfuerzos derivados del procedimiento operatorio de estos ensayos son más desfavorables que los diagramas que resultan de una situación real (Capítulo V.5.4.1).

### VI.5.2. PUESTA EN OBRA Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS

A continuación se detalla el proceso de puesta en obra y valoración económica de la solución planteada. Se considera la reparación del empotramiento de una viga en un muro. Para ello se supone una vigueta de 10x15 cm de escuadría y 0,70 m de intereje. La reparación se ejecuta con 2 placas de refuerzo.

#### Fase 1. Apeo del forjado.

Se apeará el forjado mediante puntales telescópicos y tablones de madera.

Valoración económica ..... 25,53€

\* Se considera el apeo de un forjado de 4 m de luz desde uno de sus apoyos hasta el centro del vano y un intereje de 0,70 m. Medición: 1,40 m<sup>2</sup>

Montaje y desmontaje de apeo de forjado horizontal con altura libre de planta de hasta 3 m de altura, compuesto por puntales metálicos telescópicos y tablones de madera.

m <sup>2</sup>	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
m <sup>3</sup>	Tablón de madera de pino, dimensiones 20x7,2 cm.	0,002	266,09	0,53
Ud	Puntal metálico telescópico, para 3 m de altura y 50 usos.	1,000	0,23	0,23
kg	Clavos de acero.	0,050	1,00	0,05
h	Oficial 1ª construcción.	0,488	17,56	8,57
h	Peón ordinario construcción.	0,488	16,35	7,98
%	Medios auxiliares	2,000	17,36	0,35
%	Costes indirectos	3,000	17,71	0,53
				Total: 18,24 €

#### Fase 02. Desmontaje del forjado.

Se retirará el pavimento, el relleno, los zoquetes y el entarimado en los empotramientos de las vigas a reparar y en sus proximidades (Figura VI.99.a).

Valoración económica ..... 18,97€

\* Se considera la demolición y el desmontaje de la zona anterior apeada (un forjado de 4 m de luz desde uno de los apoyos hasta el centro del vano y un intereje de 0,70 m). Medición: 1,40 m<sup>2</sup>.

Demolición de pavimento y relleno existentes, y desmontaje de entrevigado formado por tableros de madera machiembrados, con medios manuales y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
h	Peón especializado construcción.	0,271	16,74	4,53
h	Peón ordinario construcción.	0,513	16,35	8,38
%	Medios auxiliares	2,000	12,91	0,25
%	Costes indirectos	3,000	16,93	0,39
				Total: 13,55 €



Fase 03. Apertura del hueco en el muro.

Se abrirá un calo en el muro para descubrir el empotramiento de las viguetas del forjado y poder ejecutar su reparación.

Valoración económica ..... 7,32€

\* Se considera la apertura de un hueco en el muro de 0,40 x 0,40 m de superficie y 0,30 m de profundidad. Medición: 0,048 m<sup>3</sup>.

Apertura de hueco en muro de fábrica de ladrillo cerámico macizo con medios manuales, y carga manual de escombros a camión o contenedor.

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
h	Amoladora angular equipada con disco de corte de diamante.	0,918	4,14	3,80
h	Peón especializado construcción.	4,275	16,74	71,56
h	Peón ordinario construcción.	4,275	16,35	69,90
%	Medios auxiliares	2,000	145,26	2,91
%	Costes indirectos	3,000	148,17	4,45
		Total: 152,62 €		

Fase 04. Preparación de la superficie.

Se retirará la parte degradada de la viga y se abrirá un cajeadado en la misma para albergar la/s placa/s de refuerzo. Debe cuidarse el acabado de la superficie tanto del cajeadado como del área saneada para evitar que queden restos y/o suciedad en los mismos y que pudiesen dificultar el proceso posterior de adhesión de la placa y la prótesis (Figura VI.99 b. y c.).

Valoración económica ..... 27,49€

\* Se considera el saneado de la viga y la apertura de 2 cajeadados de 50 cm de longitud para el alojamiento de las placas.

Saneado de zona degradada de la viga mediante corte con motosierra a gasolina, de 50 cm de espada y 3,2 CV de potencia.

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
h	Motosierra a gasolina, de 50 cm de espada y 3,2 CV de potencia.	0,077	2,62	0,20
h	Peón especializado construcción.	0,22	14,60	3,212
%	Medios auxiliares	2,000	3,41	0,07
%	Costes indirectos	3,000	3,50	0,10
		Total: 3,58 €		

Apertura cajeadado de 1,5 cm de espesor en la viga, para el alojamiento de las placas de refuerzo, mediante tupí eléctrico para entallar.

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
m	Tupí eléctrico para entallar elementos de madera.	0,50	4,37	2,18
h	Oficial 1º carpintero.	0,344	17,86	6,14
h	Ayudante carpintero.	0,177	17,06	3,07
%	Medios auxiliares	2,000	11,39	0,22
%	Costes indirectos	3,000	11,61	0,345
		Total: 11,95 €		

### Fase 05. Ejecución de la reparación.

Para la ejecución de la reparación, previamente, debe prepararse la/s placa/s de refuerzo necesarias y las prótesis de madera a emplear. La fabricación de la placa requiere conocer las dimensiones de la viga original y la longitud de refuerzo requerida. Su preparación se realizará siguiendo el proceso detallado en el Capítulo IVI.5. Por su parte, la prótesis de madera suplementará la parte degradada de la viga que se ha retirado. Se procederá a configurar la unión negativa de la madera preexistente. Para ello, debe seleccionarse una madera de clase de resistente y durabilidad iguales o mejores a las que presenta la viga original. La humedad de la madera que vamos a introducir debe estar entorno a la prevista para la viga en condiciones de servicio. Una vez preparadas la placa y la prótesis se procederá a su fijación.

Inicialmente se fijará la placa de refuerzo para lo que se rellenará el cajeadado de la viga con resina epoxi (Figura VI.99. d.). La placa se fijará dentro del cajeadado mediante sargentos, cuidando que se conserve en una posición correcta. Seguidamente se realizará la unión de la prótesis con la viga y la placa mediante resina epoxi (Figura VI.99. e.). Para ello la aplicación de la resina debe realizarse con un instrumento que permita su extensión homogénea y cuidando que no queden burbujas de aire. Una vez aplicada la resina se procederá a unir las 2 o 3 partes de la prótesis con la/s placa/s de refuerzo.

Una vez ajustada la unión, se colocarán las chapas aplicadoras de presión y se ajustarán los sargentos para proceder a aplicar presión sobre la misma. Transcurrido el periodo de prensado, se procederá a retirar los sargentos.

Valoración económica ..... 76,62€

\* Se considera la fabricación de 2 placas de refuerzo de 0,15 m de altura, 5 mm de espesor y 1 m de longitud y su montaje sobre cajeados de 15 mm de espesor. Asimismo se considera una prótesis total de 0,15 m de altura, 0,09 m de espesor y 0,50 m de longitud.

Preparación y suministro de placas de refuerzo de fibra de vidrio reforzadas con resina de poliéster de 5 mm de espesor.

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
m <sup>2</sup>	Tejido de fibra de vidrio para fabricación de la placa.	0,30	0,73	0,11
m <sup>2</sup>	Plancha de corcho de 3mm de espesor para placa.	0,15	6,70	1,05
kg	Resina ortoftálica y peróxido de mek para preparación de la resina de poliéster.	0,20	7,20	1,44
h	Peón especializado construcción.	0,25	16,74	4,18
%	Medios auxiliares	2,000	6,78	0,13
%	Costes indirectos	3,000	6,91	0,21
				Total: 7,11 €

Montaje de placa de refuerzo de 5 mm de espesor en el interior del cajeadado. Incluso p/p de vertido de resina epoxi en la ranura tras colocar la placa, limpieza y retirada material sobrante.

Medición resina epoxi 1 cajeadado: 15 x 50 x 1,5 = 1125 cm<sup>3</sup> de epoxi

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
Kg	Resina epoxi de dos componentes (plainpox 4307 y plaindur 1208) para fijación de la placa de refuerzo	1,52	11,27	17,11
h	Peón especializado construcción.	0,160	16,74	2,68
%	Medios auxiliares	2,000	19,79	0,40
%	Costes indirectos	3,000	20,19	0,61
				Total: 20,79 €

Suministro y montaje de prótesis de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L.) España, calidad MEG, clase resistente C-18, protección de la madera con clase de penetración P2, trabajada en taller, adherida a la madera sana y a la placa de refuerzo mediante resina epoxi. Incluso p/p de retirada de zona degradada, fijación provisional de la prótesis mediante gatos de carpintero y clavos, lijado de imperfecciones, limpieza y retirada de material sobrante.

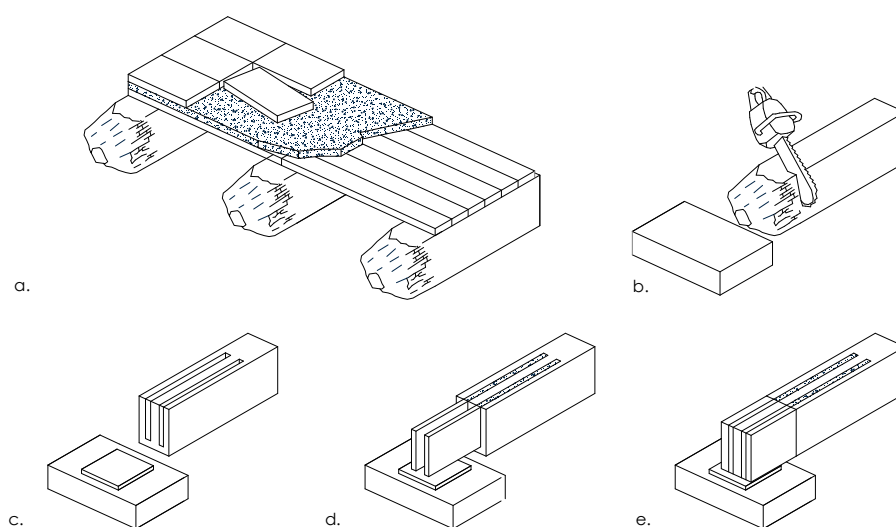
Medición prótesis:  $9 \times 15 \times 50 = 6750 \text{ cm}^3 = 0,0067 \text{ m}^3$  de madera

Medición resina epoxi:  $15 \times 50 \times 4$  (nº de caras) =  $3000 \text{ cm}^2 = 0,3 \text{ m}^2 \rightarrow 0,3 \times 0,001$  (espesor) =  $0,0003 \text{ m}^3$

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
m³	Madera aserrada de pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L.) España, acabado cepillado, para aplicaciones estructurales, calidad estructural MEG según UNE 56544, clase resistente C-18 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912 y protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración P2 (3 mm en las caras laterales de la albura y 40 mm en sentido axial) según UNE-EN 351-1, trabajada en taller.	0,0067	321,47	2,15
Kg	Resina epoxi de dos componentes (plainpox 4307 y plaindur 1208) para fijación de la prótesis	0,40	11,27	4,50
Kg	Clavos de acero	0,087	1,00	0,09
h	Oficial 1ª construcción.	0,145	17,56	2,55
h	Peón especializado construcción.	0,130	16,74	2,18
h	Ayudante carpintero.	0,250	17,06	4,27
h	Peón ordinario construcción.	0,250	16,35	4,09
%	Medios auxiliares	2,000	19,83	0,40
%	Costes indirectos	3,000	20,22	0,60
		Total: 20,82 €		

#### Fase 06. Reconstrucción del muro y retirada de los apeos.

Terminado el periodo de secado de la resina, se procederá a reconstruir el muro y a realizar las labores de acabado oportunas.



**Figura VI.99.** Puesta en obra de la solución de reparación del empotramiento de una viga.

**Valoración económica global de la solución aportada: 155,93 €**

### Comparativa económica con el Sistema Beta

Se detalla un análisis económico comparativo de la solución planteada con el sistema de reparación más extendido en el mercado, el Sistema Beta.

Para realizar este análisis se aplica la solución de reparación de este sistema al caso planteado anteriormente, una viga de 10 x 15 cm de escuadría y un intereje de 0,70 m.

Las fases iniciales del proceso (Fases 1, 2 y 3) coinciden con el proceso desarrollado.

#### Fase 1. Apeo del forjado.

Se apeará el forjado mediante puntales telescópicos y tabloncillos de madera.

Valoración económica ..... 25,53€

\* Se considera el apeo de un forjado de 4 m de luz desde uno de sus apoyos hasta el centro del vano y un intereje de 0,70 m. Medición: 1,40 m<sup>2</sup>

#### Fase 02. Desmontaje del forjado.

Se retirará el pavimento, el relleno, los zoquetes y el entarimado en los empotramientos de las vigas a reparar y en sus proximidades (Figura VI.99.a).

Valoración económica ..... 18,97€

\* Se considera la demolición y el desmontaje de la zona anterior apeada (un forjado de 4 m de luz desde uno de los apoyos hasta el centro del vano y un intereje de 0,70 m). Medición: 1,40 m<sup>2</sup>.

#### Fase 03. Apertura del hueco en el muro.

Se abrirá un calo en el muro para descubrir el empotramiento de las viguetas del forjado y poder ejecutar su reparación.

Valoración económica ..... 7,32€

\* Se considera la apertura de un hueco en el muro de 0,40 x 0,40 m de superficie y 0,30 m de profundidad. Medición: 0,048 m<sup>3</sup>.

#### Fase 04. Ejecución de la reparación.

Reparación de cabeza de vigueta de madera, mediante armaduras de fibra de vidrio.

Valoración económica ..... 269,50€

Reparación de cabeza de viga de madera, eliminando el extremo deteriorado y macizándolo con 21 kg de mortero fluido de dos componentes a base de resina epoxi, armado con **2 varillas de fibra de vidrio reforzada con resina de poliéster**, embebida en una matriz epoxi, Mbar 165/2500 "BASF Construction Chemical", de 12 mm de diámetro y **50 mm de longitud** cada una, ancladas a la vigueta con resina epoxi-acrilato, libre de estireno, de altas resistencias, aplicada con boquilla de dosificación y mezcla automática en taladros realizados en la parte sana de la madera, previa imprimación de la superficie de madera con lechada del mismo mortero epoxi.

# DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS

Ud	Descomposición	Rend.	p.s.	Precio partida
m	Film estirable transparente de 500 mm de ancho y 23 $\mu$ de espesor.	1,500	0,02	0,03
Ud	Cartucho de resina epoxi-acrilato, libre de estireno, de dos componentes, con dosificador y boquilla de mezcla automática, de 380 ml, para anclajes estructurales verticales y horizontales.	0,520	13,62	7,08
m	Varilla de fibra de vidrio reforzada con resina de poliéster, de 12 mm de diámetro, con superficie arenada como mejora de la adherencia, para armado y refuerzo estructural.	0,105	6,70	0,70
kg	Mortero fluido de dos componentes a base de resina epoxi, con endurecedor amínico, sin retracción, para anclajes y rellenos, según UNE-EN 1504-6.	16,80	6,05	101,64
m <sup>2</sup>	Encofrado y desencofrado continuo con puntales, sopandas metálicas y superficie encofrante de madera tratada reforzada con varillas y perfiles, en vigas de hormigón armado, entre 3 y 4 m de altura libre de planta.	1,000	33,13	33,13
h	Taladradora eléctrica de mano.	0,282	3,56	1,00
h	Motosierra a gasolina, de 50 cm de espada y 3,2 CV de potencia.	0,427	2,62	1,12
h	Oficial 1ª construcción.	1,507	17,56	26,46
h	Peón ordinario construcción.	1,501	16,35	24,64
h	Oficial 1ª carpintero.	1,739	17,86	31,06
h	Ayudante carpintero.	1,739	17,06	29,67
%	Medios auxiliares	2,000	256,53	5,13
%	Costes indirectos	3,000	261,66	7,85
		Total: 269,50 €		

**Valoración económica global del Sistema Beta: 321,32 €.**

### ***Discusión de resultados y conclusiones:***

La valoración económica de la solución aportada revela una importante reducción de su coste de ejecución frente al actual sistema Beta, ampliamente extendido en el campo de la reparación de forjados de madera. La sustitución del relleno de mortero epoxi por una prótesis de madera contribuye en gran medida al abaratamiento de esta solución.

## CAPÍTULO VII.

# CONCLUSIONES

**VII.1.** CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

**VII.2.** CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL

**VII.3.** CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA

**VII.4.** CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS

**VII.5.** CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS

COROLARIO





## **VII.1. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS**

---

VII.1.1. ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS REALIZADOS EN LABORATORIO

VII.1.2. APLICACIÓN IN SITU DE LA TÉCNICA DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS



### VII.1.1. ENSAYOS DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Los resultados obtenidos de los ensayos con termografía de infrarrojos bajo condiciones de laboratorio permiten extraer las siguientes conclusiones:

#### ***Estudio sobre la influencia de la densidad de la madera en su temperatura superficial:***

1. La termografía de infrarrojos es una técnica no destructiva de inspección que permite distinguir diferentes tipos de madera como resultado de una diferencia de densidad entre ellas. De esta forma se pueden localizar reparaciones realizadas con aporte de madera y/o sustituciones llevadas a cabo sobre una estructura con anterioridad.

De los ensayos realizados según las condiciones descritas en el Capítulo V.1.3.1. se han obtenido las siguientes ecuaciones de regresión:

#### Termografía pasiva:

$$T_s = 0,0024 d + 25,387 \quad R^2 = 0,93$$

siendo;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en °C.  
 $d$  Densidad de la muestra de madera en Kg/m<sup>3</sup>.

Termografía activa (durante la fase de enfriamiento de las piezas tras haberlas estimulado térmicamente en estufa):

- A los 2 minutos:	$T_s = 0,0872 d + 26,72$	$R^2 = 0,96$
- A los 10 minutos:	$T_s = -4 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,52 d - 105,43$	$R^2 = 0,96$
- A los 15 minutos:	$T_s = -5 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,5898 d - 129,6$	$R^2 = 0,97$
- A los 20 minutos:	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,3412 d - 64,97$	$R^2 = 0,97$
- A los 30 minutos:	$T_s = -3 \cdot 10^{-4} d^2 + 0,369 d - 75,825$	$R^2 = 0,97$

siendo;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en grados centígrados, °C.  
 $d$  Densidad de la muestra de madera en Kg/m<sup>3</sup>.

2. La termografía de infrarrojos permite localizar defectos y/o singularidades superficiales de la madera, como nudos y fendas. Esto es posible debido a la diferencia de densidades entre la madera sana y estas singularidades, nudos, o como resultado de una variación puntual de la emisividad del material, fendas.

#### ***Detección de diferentes contenidos de humedad en la madera:***

1. La termografía de infrarrojos permite detectar zonas con un distinto contenido de humedad debido a la alteración de las propiedades térmicas del material producida por el agua. Este aspecto supone un avance importante para la inspección de forjados y cubiertas de madera ya que los focos de humedad suponen habitualmente la localización de un deterioro o de un inicio del mismo.

## CONCLUSIONES

De los ensayos realizados según las condiciones descritas en el Capítulo V.1.3.2. se ha obtenido la siguiente ecuación de regresión:

Termografía pasiva:

$$T_s = -0,0835 H + 24,7 \quad R^2 = 0,92$$

siendo;

$T_s$  Temperatura superficial de la muestra en grados centígrados, °C.  
 $H$  Contenido de humedad de la muestra en porcentaje, %.

### **Detección de defectos internos:**

#### **Defectos internos secos:**

1. La termografía de infrarrojos no permite detectar defectos internos secos en la madera si no se aplica ninguna fuente de estimulación térmica (termografía pasiva). Por el contrario, al emplear una fuente adicional de calor (termografía activa) es posible provocar un contraste térmico en las piezas detectando, de este modo, las zonas defectuosas. No obstante, debido a la baja conductividad térmica de la madera, la detección de defectos presenta limitaciones referidas a la profundidad máxima del defecto detectable y a su tamaño mínimo.

De los ensayos realizados en las condiciones descritas en el Capítulo V.1.3.3. se obtienen las siguientes conclusiones:

Termografía activa:

Durante el proceso de enfriamiento de las probetas tras su estimulación térmica en estufa es posible detectar los defectos internos de un tamaño de 40x40 mm cuando éstos se sitúan a profundidades de hasta 15 mm. Los incrementos térmicos máximos obtenidos entre los defectos y las zonas sanas de las probetas oscilan entre 12 °C, para los defectos más cercanos a la superficie (5 mm), y 1°C, para los defectos más profundos (15 mm). La posición en el tiempo de estos máximos es más tardía conforme el defecto es más profundo. Las expresiones de regresión obtenidas en cada caso son las siguientes:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	0,82
	t [200 - 2700 s]	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	0,99
Defecto a 10 mm	t (0 - 400 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0189t - 0,1121$	0,96
	t [400 - 2700 s]	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0029t + 5,3487$	0,97
Defecto a 15 mm	t (0 - 400 s)	$\Delta T = 0$	-
	t (400 - 1200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0041t - 1,3239$	0,75
	t (1200 - 2700 s)	$\Delta T = 4 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0018t + 2,3258$	0,40

Siendo en cada caso;

$t$  Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^a$  área sana de la probeta -  $T^a$  defecto) en grados centígrados, °C

Asimismo, para una profundidad dada de 5 mm, es posible detectar defectos con un tamaño mínimo de 20x20 mm. En este caso, las variaciones térmicas máximas oscilan entre 12 °C para los defectos de un tamaño de 40x40 mm y de 2,5 °C para los defectos de 20x20 mm. Las ecuaciones de regresión obtenidas son las siguientes:

Tamaño del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	(0 - 200 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0488t + 9,017$	0,82
	(200 - 2400 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,01t + 13,399$	0,99
Defecto de 20x20 mm	(0 - 400 s)	$\Delta T = -3 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0168t - 0,2087$	0,84
	(400 - 1500 s)	$\Delta T = 9 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0031t + 2,7705$	0,94
	(1500 - 2400 s)	$\Delta T = 0$	-
Defecto de 10x10 mm	Sin resultados perceptibles		

Siendo en cada caso;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto (T<sup>a</sup> área sana de la probeta – T<sup>a</sup> defecto) en grados centígrados, °C

Al sustituir la fuente de estimulación térmica por un foco externo portátil es posible estudiar el fenómeno de estimulación térmica en dos fases: calentamiento y enfriamiento. En este caso la intensidad del contraste térmico viene condicionada por la distancia del foco a las probetas.

Al situar el foco a 0,70 m se logra detectar los defectos de un tamaño de 40x40 mm situados a una profundidad máxima de 5 mm. Las diferencias térmicas alcanzan unos valores de 2 °C en la fase de calentamiento y 1,7 °C durante el proceso de enfriamiento. Si se acerca la posición del foco a 0,35 m las diferencias térmicas se incrementan, si bien los defectos más profundos resultan indetectables. En esta situación se logra alcanzar un incremento térmico de 3,30 °C, en la fase de calentamiento, y 4 °C, en la fase de enfriamiento. Las ecuaciones de regresión obtenidas para cada caso son las siguientes:

Foco situado a 0,70 m de las muestras:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 1000 s)	CAL.	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-8}t^3 + 2 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0127t + 0,4918$	0,83
	t [1000 - 1800 s)	ENFR.	$\Delta T = -5 \cdot 10^{-6}t^2 + 0,0149t - 9,3563$	0,72
Defecto a 10 mm	Sin resultados perceptibles			
Defecto a 15 mm	Sin resultados perceptibles			

Siendo en cada caso;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto (T<sup>a</sup> área sana de la probeta – T<sup>a</sup> defecto) en grados centígrados, °C

Foco situado a 0,35 m de las muestras:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	CAL.	$\Delta T = 0$	-
	t [200 - 800 s]	CAL.	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0296t + 3,9796$	0,88
	t [800 - 1600s]	ENFR.	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0250t - 11,50$	0,76
Defecto a 10 mm	Sin resultados perceptibles			
Defecto a 15 mm	Sin resultados perceptibles			

Siendo en cada caso;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C

Asimismo, situando el foco a 0,35 m y para una profundidad dada de 5 mm, se logra detectar los defectos con un tamaño máximo de 20x20 mm. En este caso, las diferencias térmicas máximas alcanzan un valor de 5 °C durante el proceso de calentamiento, para los defectos de 40x40 mm, y 3 °C durante la fase de enfriamiento, tanto para los defectos de 40x40 mm como para los defectos de 20x20 mm. Las expresiones obtenidas en cada caso son las siguientes:

Foco situado a 0,35 m de las muestras:

Tamaño del defecto	Tiempo (t)	Proceso	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	(0 - 600 s)	CAL.	$\Delta T = 7 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,0466t + 2,7347$	0,86
	(600 - 1400 s)	ENFR.	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0418t - 18,69$	0,94
Defecto de 20x20 mm	(0 - 600 s)	CAL.	$\Delta T = 0$	-
	(600 - 1400 s)	ENFR.	$\Delta T = 5 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0123t + 8,5872$	0,97
Defecto de 10x10 mm	Sin resultados perceptibles			

siendo;

t Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$  Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C

#### **Defectos internos húmedos:**

1. La termografía de infrarrojos permite detectar defectos internos húmedos en la madera mediante el empleo de una fuente adicional de calor que estimule las piezas (termografía activa) y provoque un contraste térmico en las piezas detectando, de este modo, las zonas defectuosas. El agua provoca una alteración de las propiedades térmicas de la madera lo que implica que se acentúen las diferencias térmicas entre la madera sana y la zona con defectos.

De los ensayos realizados en las condiciones descritas en el Capítulo V.1.3.3. se obtienen las siguientes conclusiones:

Termografía activa:

Durante el proceso de enfriamiento de las probetas tras su estimulación térmica en estufa e incrementando el contenido de humedad de las zonas defectuosas detectamos que es posible localizar defectos internos de un tamaño de 40x40 mm cuando éstos se sitúan a profundidades de hasta 15 mm. En esta situación los incrementos térmicos máximos obtenidos entre los defectos y las zonas sanas de las probetas se acentúan con respecto al caso anterior, oscilando entre 20 °C, para los defectos más cercanos a la superficie (5 mm), y 2°C, para los defectos más profundos (15 mm). Nuevamente, la posición en el tiempo de estos máximos es más tardía conforme el defecto es más profundo. Las expresiones de regresión obtenidas en cada caso son las siguientes:

Profundidad del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto a 5 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92$	0,96
	t (200 - 3000 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096$	0,97
Defecto a 10 mm	t (0 - 700 s)	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,0049t + 8,977$	0,82
	t (700 - 3000 s)	$\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0049t + 9,3411$	0,98
Defecto a 15 mm	t (0 - 1000 s)	$\Delta T = 1 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,0011t + 1,7994$	0,81
	t (1000 - 3000 s)	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 + 0,0003t + 0,9409$	0,54

siendo en cada caso;

t      Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C

Asimismo, para una profundidad dada de 5 mm, el estudio de defectos en fundón de su tamaño revela que, al incrementar el contenido de humedad de los defectos, los incrementos térmicos se acentúan respecto al caso de estudio anterior y es posible detectar defectos con un tamaño mínimo de 10x10 mm. En este caso, las variaciones térmicas máximas oscilan entre 20 °C para los defectos de un tamaño de 40x40 mm, 9 °C para los defectos de 20x20 mm y de 5 °C para los defectos de 10x10 mm. Las ecuaciones de regresión obtenidas son las siguientes:

Tamaño del defecto	Tiempo (t)	Ecuación de regresión	Coeficiente de Correlación (R <sup>2</sup> )
Defecto de 40x40 mm	t (0 - 200 s)	$\Delta T = -4 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,1018t + 12,92$	0,96
	t (200 - 3000 s)	$\Delta T = 2 \cdot 10^{-6}t^2 - 0,0125t + 18,096$	0,97
Defecto de 20x20 mm	t (0 - 300 s)	$\Delta T = -2 \cdot 10^{-4}t^2 + 0,0625t + 3,7586$	0,80
	t (300 - 3000 s)	$\Delta T = 8 \cdot 10^{-7}t^2 - 0,0039t + 5,5351$	0,90
Defecto de 10x10 mm	(0-800 s)	$\Delta T = -1 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,015t + 0,1746$	0,96
	t (800 - 3000 s)	$\Delta T = 3 \cdot 10^{-8}t^2 - 0,002t + 6,9578$	0,97

siendo en cada caso;

t      Tiempo desde que finaliza la estimulación térmica en segundos, s.  
 $\Delta T$     Incremento térmico medido entre la zona sana de la probeta y la zona con defecto ( $T^{\circ}$  área sana de la probeta –  $T^{\circ}$  defecto) en grados centígrados, °C

## VII.1.2. APLICACIÓN IN SITU DE LA TÉCNICA DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

Según los resultados de la aplicación in situ de la técnica es posible concluir que:

1. La aplicación in situ de la técnica de termografía de infrarrojos, dada la gran cantidad de variables que la condicionan (propiedades térmicas de la madera, baja conductividad térmica y difusividad, condiciones del entorno de trabajo, profundidad de los defectos) presenta limitaciones importantes.
2. Para la inspección de cubiertas de madera de edificios en Andalucía, casos de San Felipe Neri Cádiz (Anejo A) y la Iglesia de Ntra. Sra. de los Dolores, Isla Cristina (Anejo B), el soleamiento natural favorece su aplicación actuando como fuente de estimulación. El flujo de calor originado como consecuencia del proceso de calentamiento/enfriamiento de la cubierta favorece el contraste térmico en las zonas que presentan alguna irregularidad (termografía activa) facilitando la localización de los defectos superficiales (nudos, fendas) y/o la existencia de diferentes tipos de madera. Aún así, para la detección de defectos internos este aporte de calor no resulta suficiente por lo que es necesario aplicar una fuente adicional de calor que provoque un mayor contraste térmico, quedando reservado fundamentalmente a condiciones de laboratorio. Asimismo, dado el escaso tamaño de los defectos superficiales (nudos y fendas) y de los deterioros internos (galerías provocadas por agentes xilófagos y/o termitas) es necesario conseguir un nivel de aproximación aceptable (1-2 m), dependiendo de la resolución del equipo de termografía empleado.
3. Para su aplicación en la inspección de forjados de planta, forjados intermedios, en los que no es posible aprovechar el soleamiento natural, es necesario montar un dispositivo de ensayo para estimular térmicamente la madera, caso del Convento Virgen de los Reyes, Sevilla. De esta forma se provoca un choque térmico en el material que favorece la localización de los defectos superficiales y/o internos y la existencia de diferentes tipos de madera. Análogamente, en estos casos es necesario conseguir un nivel de aproximación aceptable dependiendo del nivel de resolución de los equipos termográficos. En el caso mencionado, Convento Virgen de los Reyes, la imposibilidad de montar un dispositivo para estimular térmicamente la madera impidió la realización de ensayos en estas condiciones. Por el contrario, los ensayos se realizan bajo condiciones de termografía pasiva, es decir, sin emplear fuente adicional de calor. Los resultados obtenidos permitieron localizar los focos de humedad existentes. No obstante, no aportaron ninguna información sobre el estado de deterioro de los forjados, a pesar de que en los muros se detectaron cordones de termitas que ascendían desde el terreno hasta los forjados.

Con todo ello, podemos concluir que la termografía de infrarrojos es una técnica que presenta limitaciones para la inspección de estructuras de madera. Sin embargo, resulta indudable es que una técnica útil y eficaz para la detección de humedades desde una cierta distancia sin necesidad de acceder directamente al elemento a inspeccionar. Este hecho adquiere una especial relevancia para la inspección de estructuras de madera en las que los focos de humedad son síntomas de un deterioro o de un inicio del mismo. Partiendo de aquí esta técnica se puede complementar con otras, como los ultrasonidos, que permitan realizar un diagnóstico más preciso y aproximado para evaluar la capacidad resistente de un determinado elemento.



## **VII.2. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*Pinus Sylvestris* L) Y PINO LARICIO (*Pinus Nigra* Arnold). CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

---

### **VII.2.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA**

### **VII.2.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA**



## VII.2.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

Los ensayos realizados sobre madera sana permiten concluir:

### **Ensayos no destructivos (END):**

Los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos (END) realizados sobre madera sana permiten extraer las siguientes conclusiones:

#### **Ensayos de densidad:**

1. La densidad es una propiedad física de la madera que se utiliza, junto con la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, como variable clasificatoria por la norma UNE 338:2010. No obstante, según los ensayos de densidad realizados se concluye que, según la densidad, se obtienen clases resistentes muy elevadas, cuyos valores están muy por encima de los valores exigidos en norma. Como consecuencia se obtiene que “la densidad no limita la calidad de una población”.
2. Para las especies estudiadas (*Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold) resulta que la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es un 20% más densa, más pesada, que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).
3. Asimismo es posible concluir que para una misma especie de madera, en este caso pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), la madera si se conserva sana mantiene sus mismas propiedades a lo largo del tiempo, entre ellas la densidad.
4. Los ensayos realizados con pequeñas probetas confirman que, como se ha demostrado en los ensayos con probetas de tamaño estructural, la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es más densa, más pesada, que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L).

#### **Clasificación visual:**

1. El rendimiento clasificatorio de una población obtenido a partir de los criterios de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007 es menor que las clasificaciones realizadas a partir de otros parámetros como la resistencia a flexión (MOR) o el módulo de elasticidad estático (MOE).

#### **Ensayos de ultrasonidos:**

1. Los ultrasonidos se emplean actualmente como técnica no destructiva que permite obtener las capacidades mecánicas de la madera, resistencia a flexión (MOR) y/o módulo de elasticidad (MOE). A partir de las velocidades de transmisión es posible obtener las correlaciones que permiten estimar sus parámetros resistentes, correlaciones que varían según la especie y calidad de la madera.
2. La facilidad de empleo de la técnica y transporte de los equipos convierten la técnica de los ultrasonidos en una técnica muy práctica para la clasificación de la madera nueva en aserraderos y el diagnóstico de estructuras antiguas. Sin embargo, los coeficientes de correlación obtenidos entre las velocidades de ultrasonidos y los parámetros resistentes no son muy elevados (0,41 con la resistencia a flexión y 0,48 con el módulo de elasticidad para el *Pinus Sylvestris* L).

3. Las correlaciones mejoran al combinar las velocidades de transmisión de ultrasonidos de un elemento con su densidad a través del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d = V_l^2 \cdot d$ ). De este modo, las correlaciones obtenidas mejoran el ajuste de las rectas de regresión (0,68 con la resistencia a flexión y 0,90 con el módulo de elasticidad para el *Pinus Sylvestris* L).
4. Las velocidades de ultrasonidos están afectadas por varios factores:
  - a. Tipo de madera
  - b. Densidad de la madera
  - c. Humedad
  - d. Posición de la fibra
  - e. Distancia entre los transductores de los equipos de ultrasonidos

Como consecuencia los resultados obtenidos de las mediciones de ultrasonidos deben ser corregidos de acuerdo a estos criterios. En el presente trabajo se han deducido las correcciones necesarias para la aplicación a la madera de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold)<sup>1</sup>. Las correcciones deducidas en el presente trabajo son las siguientes:

#### **Contenido de humedad:**

Se ha determinado que las velocidades de transmisión de ultrasonidos, tanto en la dirección normal como paralela a fibra, están influenciadas por el contenido de humedad de la madera, conclusión en la que coincidimos con otros autores (Sandoz, 1989, Mishuri, 1996).

La influencia del contenido de humedad sobre las velocidades de transmisión es más importante para la dirección perpendicular a la fibra, velocidad normal, que para la velocidad en dirección paralela a la fibra, velocidad longitudinal.

Para referir todas las velocidades a un contenido de humedad de referencia, 12%, se proponen las siguientes ecuaciones para la madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold):

$$V_{N12} = 15,89 (H_1 - 12) + V_1$$

siendo;

$V_{N12}$  Velocidad normal corregida (referida al 12% de humedad) en m/s.  
 $V_1$  Velocidad normal a una humedad  $H_1$  en m/s.

$$V_{L12} = 32,698 (H_1 - 12) + V_1$$

siendo;

$V_{L12}$  Velocidad longitudinal al 12% de humedad en m/s.  
 $V_1$  Velocidad longitudinal a una humedad  $H_1$  en m/s.

(Ecuaciones válidas para contenidos de humedad  $\leq 28\%$ )

Por encima de un contenido de humedad del 28%, las velocidades de transmisión, tanto normal como longitudinal, se mantienen prácticamente constantes.

<sup>1</sup> En trabajos de investigación precedentes de este Grupo de Investigación (Rubio de Hita, 1997) se han estimado las correlaciones necesarias para la corrección de las velocidades de ultrasonidos en la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L).

### **Posición de los anillos de crecimiento:**

Las velocidades de transmisión perpendiculares a la fibra (velocidades normales) están afectadas por la posición de la fibra.

Para referir todas las mediciones de velocidad normal a una posición de fibra única se han determinado unos coeficientes de conversión a velocidad normal. Para aplicar estos coeficientes es necesario conocer la posición de la fibra en cada caso, centrada o extrema.

#### **a. Posición de fibra centrada:**

$$C_1 = 1,33$$

$$C_2 = 1,05$$

$$C_3 = 1,33$$

#### **b. Posición de fibra extrema:**

$$C_1 = 1,50$$

$$C_2 = 1,35$$

$$C_3 = 1,14$$

Asimismo, se han determinado unos coeficientes correctores globales de la velocidad media dentro de una sección dependiendo de la posición de la fibra, centrada o extrema. Estos coeficientes permiten corregir la velocidad media dentro de una sección y aproximarla al valor de velocidad normal perfecta con un error inferior al 10%.

#### **a. Posición de fibra centrada:**

$$C = 1,20$$

#### **b. Posición de fibra extrema:**

$$C = 1,31$$

### **Distancia entre transductores:**

La distancia entre los transductores del equipo de ultrasonidos interviene sobre los valores de la velocidad de ultrasonidos. En estos coincidimos con otros autores (Acuña et al., 2006). Estos autores sostienen que la distancia y el ángulo entre los transductores de ultrasonidos intervienen directamente sobre la velocidad de transmisión longitudinal a la fibra.

En las velocidades normales esta distancia está condicionada por la escuadría de las piezas. Este factor interviene significativamente en piezas con pequeñas escuadrías, las llamadas pequeñas probetas. Así, para eliminar la influencia del tamaño de la escuadría se estudia las velocidades obtenidas en diferentes piezas de la misma especie con diferentes escuadrías. De este estudio se concluye que las velocidades normales están afectadas por la escuadría de las piezas cuando éstas son inferiores a 45 mm. Para referir el valor de las velocidades normales obtenidas en estas piezas a secciones mayores se propone la siguiente relación:

$$V_N = 25,726 (D_1 - 45) + V_{N1}$$

siendo;

$D_1$  Separación entre transductores (<45 mm) en mm.

$V_{N1}$  Velocidad normal para una separación  $D_1$  en m/s.

## CONCLUSIONES

- Para la madera sana debe emplearse la velocidad longitudinal de ultrasonidos como variable predictora. Las velocidades normales o tangenciales ofrecen lecturas puntuales de un elemento sin proporcionar una información global del elemento en cuestión.
- Se ha demostrado que la velocidad longitudinal de ultrasonidos media de un lote de madera disminuye al bajar la calidad del lote. En estos resultados coincidimos con otros autores (Acuña et al., 2006) que obtienen que, para la madera de pino gallego (*Pinus Pinaster* Ait.), la velocidad longitudinal media de ultrasonidos disminuye al descender la calidad visual o el valor de los parámetros resistentes del MOR (módulo de rotura) o MOE (módulo de elasticidad) de un lote de piezas. Por el contrario, las velocidades normales, que ofrecen lecturas puntuales de las piezas, varían aleatoriamente por lo que no pueden utilizarse como variables predictoras.

Valores medios de velocidad (m/s)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (nueva)	<i>Pinus Sylvestris</i> L (vieja)
Calidad ME-1	V <sub>L</sub> : 4985,66 V <sub>N</sub> : 1792,39	V <sub>L</sub> : 5536,17 V <sub>N</sub> : 2061,41
Calidad ME-2	V <sub>L</sub> : 4870,00 V <sub>N</sub> : 1831,61	V <sub>L</sub> : 5387,10 V <sub>N</sub> : 1998,18
Calidad RECHAZO	V <sub>L</sub> : 4555,03 V <sub>N</sub> : 1925,32	V <sub>L</sub> : 5238,89 V <sub>N</sub> : 2097,14

- El rango de velocidades ultrasonidos y, por tanto, las relaciones entre las mismas es similar para las 2 especies de madera estudiadas (*Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold), con un margen de diferencia muy pequeño. Por tanto, se deduce que no es posible establecer un criterio fiable que permita, a partir de una medición con ultrasonidos, discriminar entre elementos de ambas especies.

	Velocidades ultrasonidos medias (m/s)		
	Longitudinal, V <sub>L</sub>	Normal, V <sub>N</sub>	Tangencial, V <sub>T</sub>
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	4866,03	1825,79	1257,68
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	4570,91	1972,93	1552,44

	Relación entre velocidades		
	V <sub>L</sub> /V <sub>N</sub>	V <sub>L</sub> /V <sub>T</sub>	V <sub>N</sub> /V <sub>T</sub>
Pino silvestre ( <i>Pinus Sylvestris</i> L)	2,69	3,92	1,46
Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arnold)	2,34	3,02	1,29

- Los ensayos de ultrasonidos realizados sobre pequeñas probetas arrojan en todos los casos unos valores de velocidad superiores a los valores obtenidos para las probetas de tamaño estructural. De esta forma queda demostrada la influencia de la separación entre transductores en la velocidad de ultrasonidos referida y deducida en el Capítulo VI.2.1.1.3 para el caso de las velocidades normales.

Asimismo, del análisis comparativo de las velocidades por especies se deduce, nuevamente, la similitud de los resultados y, por tanto, la imposibilidad de distinguir ambos tipos de madera en función a este parámetro. Los resultados obtenidos son:

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE PINO SILVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS* L) Y PINO LARICIO (*PINUS NIGRA* Arnold).  
CORRELACIÓN CON PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN VISUAL**

Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arn)	Velocidades ultrasonidos medias (m/s)			
		Longitudinal, $V_L$	Normal, $V_N$	Tangencial, $V_T$
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm <sup>3</sup> )	4882,17	2238,29	1715,80
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm <sup>3</sup> )	4570,91	1972,93	1552,44

Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	Velocidades ultrasonidos medias (m/s)			
		Longitudinal, $V_L$	Normal, $V_N$	Tangencial, $V_T$
	Pequeñas probetas <sup>2</sup> (20 x 20 x 300 mm <sup>3</sup> )	5338,73	2179,07	1525,35
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm <sup>3</sup> )	4866,03	1825,79	1257,68

Los valores de los coeficientes de relación,  $V_L/V_N$  y  $V_L/V_T$ , son ligeramente inferiores para el caso de las pequeñas probetas como resultado de la influencia de la distancia entre transductores en los valores de  $V_N$  y  $V_T$ .

Pino laricio ( <i>Pinus Nigra</i> Arn)	Relación entre velocidades			
		$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm <sup>3</sup> )	2,22	-	-
		-	2,87	-
		-	-	1,31
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm <sup>3</sup> )	2,34	-	-
		-	3,02	-
		-	-	1,29

Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> L)	Relación entre velocidades			
		$V_L/V_N$	$V_L/V_T$	$V_N/V_T$
	Pequeñas probetas (20 x 20 x 300 mm <sup>3</sup> )	2,45	-	-
		-	3,5	-
		-	-	1,45
	Probetas gran escuadría (50 x 50 x 1000 mm <sup>3</sup> )	2,69	-	-
		-	3,92	-
		-	-	1,46

### **Ensayos destructivos:**

Los resultados obtenidos de los ensayos destructivos realizados sobre madera sana permiten extraer las siguientes conclusiones:

#### **Ensayos de determinación de la resistencia a flexión y módulo de elasticidad estático:**

1. En una especie de madera, en este caso pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L), la madera si se conserva sana mantiene sus propiedades resistentes (resistencia a flexión y módulo de elasticidad) a lo largo del tiempo.
2. Las clases resistentes asignadas según los resultados de ensayos mecánicos para los lotes de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son superiores a las clases resistentes asignadas según criterios de calidad visual por la norma UNE 56544.

<sup>2</sup> Los valores de velocidad y las relaciones entre velocidades para pequeñas probetas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son obtenidos de trabajos precedentes del Grupo de Investigación (Rubio de Hita, 1997).

## CONCLUSIONES

Asimismo la clase resistente asignada según los resultados de ensayos mecánicos para el lote de madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es superior a la clase resistente asignada según criterios de calidad visual por la norma UNE 56544.

3. Si se emplean como variables clasificatorias los resultados de los ensayos mecánicos, MOR o MOE, con independencia de las calidades visuales de las piezas, el rendimiento clasificatorio de las probetas de un lote mejora sustancialmente.
4. Los resultados obtenidos demuestran el carácter conservador de esta norma, conclusión en la que coincidimos con otros autores como Acuña et al., 2006). Según los criterios de la actual norma de clasificación visual, muchas de las estructuras de los edificios existentes están fuera de normativa siendo necesaria su sustitución en caso de una intervención sobre las mismas. Esta casuística plantea la necesidad de herramientas complementarias que se ajusten a la realidad constructiva de este tipo de estructuras y permitan abordar labores de inspección que posibiliten un diagnóstico objetivo de las mismas.
5. Los resultados de los ensayos realizados con pequeñas probetas de madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) apuntan que, aunque la actual norma de clasificación visual no considera el azulado en esta especie un defecto excluyente, se han extraído diferencias significativas entre los resultados estadísticos de los ensayos mecánicos de los lotes de madera con y sin azulado:
  - a. Para el lote de madera sin azulado se obtiene un valor medio de resistencia a flexión de 68,50 N/mm<sup>2</sup> y un valor característico de 47,08 N/mm<sup>2</sup>.
  - b. Para el lote de madera con azulado se obtiene un valor medio de resistencia a flexión de 51,81 N/mm<sup>2</sup> y una resistencia característica de 23,64 N/mm<sup>2</sup>.

### Correlaciones de los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos:

Los resultados obtenidos de los ensayos destructivos y no destructivos (END) realizados sobre madera sana permiten extraer las siguientes correlaciones:

1. Las correlaciones y coeficientes de determinación que permiten obtener, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos (VI) y la densidad ( $E_d = v_l^2 \cdot d$ ), los parámetros resistentes (resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)) de la madera sana de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) son:

#### Correlaciones globales:

Variables de correlación	Ecuación de regresión	Coeficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR – VL	$MOR = 0,0212 VI - 53,131$	0,41
MOE – VL	$MOE = 3,8296 VI - 8844,1$	0,48
MOR - MOE	$MOR = 0,0055 MOE - 8,4856$	0,69
MOR - $E_d$	$MOR = 0,0046 E_d - 12,439$	0,68
MOE - $E_d$	$MOE = 0,8295 E_d - 774,68$	0,90

Siendo en cada caso;

MOR	Resistencia de rotura en flexión en N/mm <sup>2</sup>
MOE	Módulo de elasticidad estático en flexión en N/mm <sup>2</sup>
VI	Velocidad longitudinal de ultrasonidos
$E_d$	Módulo de elasticidad dinámico en N/mm <sup>2</sup>



Correlaciones por calidades visuales:

Calidad ME-1

Variables de correlación	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR – VL	$MOR = 0,0154 V_L - 19,465$	0,31
MOE – VL	$MOE = 2,9559 V_L - 3761,9$	0,34
MOR - MOE	$MOR = 0,0048 MOE + 4,0449$	0,73
MOR - $E_d$	$MOR = 0,0041 E_d - 0,7221$	0,73
MOE - $E_d$	$MOE = 0,8009 E_d - 220,5$	0,89

Calidad ME-2

Variables de correlación	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR – VL	$MOR = 0,0122 V_L - 10,406$	0,21
MOE – VL	$MOE = 2,7588 V_L - 3009,4$	0,41
MOR - MOE	$MOR = 0,0053 MOE - 7,1937$	0,76
MOR - $E_d$	$MOR = 0,0034 E_d + 3,9391$	0,63
MOE - $E_d$	$MOE = 0,6647 E_d + 1766,5$	0,89

Rechazo

Variables de correlación	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR – VL	$MOR = 0,0065 V_L + 3,6221$	0,05
MOE – VL	$MOE = 3,4719 V_L - 3260,7$	0,32
MOR - MOE	$MOR = 0,0049 MOE - 7,6565$	0,56
MOR - $E_d$	$MOR = 0,0029 E_d + 0,332$	0,23
MOE - $E_d$	$MOE = 0,8047 E_d - 790,24$	0,72

Siendo en cada caso;

MOR Resistencia de rotura en flexión en  $N/mm^2$ .  
 MOE Módulo de elasticidad estático en flexión en  $N/mm^2$ .  
 $V_L$  Velocidad longitudinal de ultrasonidos en m/s.  
 $E_d$  Módulo de elasticidad dinámico en  $N/mm^2$ .

- Las correlaciones y coeficientes de determinación que permiten obtener, a partir de la velocidad longitudinal de ultrasonidos ( $V_L$ ) y la densidad ( $E_d = v_l^2 \cdot d$ ), los parámetros resistentes (resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad MOE)) de la madera sana de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) son:

Correlaciones por calidades visuales:

Calidad ME-1<sup>3</sup>

Variables de correlación	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
MOR – VL	$MOR = 0,0076 V_L + 28,786$	0,40
MOE – VL	$MOE = 4,3454 V_L - 9997,5$	0,85
MOR - MOE	$MOR = 0,0047 MOE + 2,3529$	0,53
MOR - $E_d$	$MOR = 0,0015 E_d + 44,225$	0,50
MOE - $E_d$	$MOE = 0,6982 E_d + 721,38$	0,87

<sup>3</sup> Todas las probetas de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) analizadas son de calidad ME-1.

Siendo en cada caso;

MOR	Resistencia de rotura en flexión en N/mm <sup>2</sup> .
MOE	Módulo de elasticidad estático en flexión en N/mm <sup>2</sup> .
V <sub>L</sub>	Velocidad longitudinal de ultrasonidos en m/s.
Ed	Módulo de elasticidad dinámico en N/mm <sup>2</sup> .

- Al introducir la variable de la densidad a partir del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d = V_L^2 \cdot d$ ) en las correlaciones, el ajuste de las rectas de regresión mejora considerablemente. Esto significa que la densidad es de suma importancia para obtener unas correlaciones fiables. De esta forma coincidimos con las conclusiones arrojadas por otros autores (Lourenço et al., 2007) para otros parámetros resistentes (resistencia a compresión) de otras especies de madera (castaño).
- Las correlaciones obtenidas entre la velocidad longitudinal y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) arrojan unos coeficientes de correlación ( $R^2$ ) más interesantes que los obtenidos entre la velocidad longitudinal de ultrasonidos y el módulo de rotura (MOR). Tanto el módulo de elasticidad (MOE) como la velocidad longitudinal de ultrasonidos aportan información global de la pieza mientras que el módulo de rotura (MOR) puede deberse a un defecto local que no tiene influencia dominante sobre la velocidad. En estas conclusiones coincidimos con Sandoz (Sandoz, 1989).
- Al bajar la calidad visual de la muestra (más defectos) baja el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) entre la velocidad de ultrasonidos y el módulo de rotura (MOR). De este modo, para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se obtienen unos coeficientes ( $R^2$ ) de 0,31, 0,21 y 0,05 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
- De igual modo, al bajar la calidad visual de la muestra (más defectos) baja la correlación ( $R^2$ ) entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y el módulo de rotura (MOR). De este modo, para la especie de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se obtienen unos coeficientes ( $R^2$ ) de 0,73, 0,63 y 0,23 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
- Las correlaciones obtenidas entre la velocidad longitudinal de ultrasonidos y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) son similares para todas las calidades visuales, 0,32, 0,41 y 0,32 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
- De igual modo, las correlaciones obtenidas entre el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ), y el módulo de elasticidad estático (MOE) aportan valores muy similares para todas las calidades visuales, 0,89, 0,89 y 0,72 para las calidades ME-1, ME-2 y Rechazo, respectivamente.
- Al deducir los parámetros resistentes mediante las ecuaciones matemáticas aportadas para la madera calidad visual ME-1 de ambas especies, se obtienen unas características mecánicas muy distintas para ambas especies. De estos resultados se deduce que ambas correlaciones no pueden usarse indistintamente pues la madera de la especie pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold) es más resistente que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). De este modo se recomienda que, si no es posible realizar una identificación anatómica de la especie de madera del elemento estudiado, se le aplicarán las correlaciones obtenidas para la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) para determinar sus parámetros resistentes, encontrándonos, así, del lado de la seguridad.

## VII.2.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

### Ensayos no destructivos (END):

Los resultados de los ensayos no destructivos (END) realizados sobre madera deteriorada permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación directa entre la pérdida de densidad de una sección de un elemento de madera y su velocidad normal de ultrasonidos. Con estos resultados se confirman las conclusiones de otros autores (Mishiro, 1996 y Rubio de Hita, 1997) en cuyos estudios demuestran que existe una relación entre la densidad de la madera y los valores de velocidad de ultrasonidos perpendicular o tangencial a la fibra.
2. Para determinar la pérdida de densidad de un elemento de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) se propone la siguiente ecuación:

$$\Delta d = 53,257 - 0,0396 V_N \quad R^2 = 0,81$$

siendo,

$V_N$  Velocidad normal del elemento estudiado en m/s.  
 $\Delta d$  Pérdida de densidad de dicho elemento en porcentaje, %.

3. Mediante la velocidad normal de ultrasonidos y la ecuación de regresión establecida es posible conocer el estado de conservación y/o diagnóstico de una estructura de madera. De este modo se han fijado tres intervalos de diagnóstico en función de la velocidad normal de ultrasonidos de un elemento:

- $V_N > 1200$  m/s  $\rightarrow$  Madera sana
- $1200$  m/s  $> V_N > 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera con inicio de deterioro. Pérdida de densidad entre 0-30%
- $V_N < 600$  m/s  $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$

Asimismo se ha fijado un criterio complementario de diagnóstico de una estructura atendiendo a una bajada de velocidad normal relativa en el elemento. El valor tomado como valor de referencia se corresponde con el valor de velocidad normal en madera sana en una sección del elemento estudiado:

- Bajada de  $V_N$ : 0%  $\rightarrow$  Madera sana.
- Bajada de  $V_N$ : 0% - 50%  $\rightarrow$  Madera con inicio de deterioro. Pérdida de densidad entre 0-30%).
- Bajada de  $V_N$ :  $> 50\%$   $\rightarrow$  Madera muy deteriorada. Pérdida de densidad  $> 30\%$ .

Con todo ello debe concluirse que para establecer el diagnóstico de una estructura debe atenderse a un doble criterio:

- Intervalos absolutos de velocidades normales.
- Intervalos relativos de bajadas de velocidad normal.

### **Ensayos destructivos:**

Los resultados de los ensayos destructivos realizados sobre madera deteriorada permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación directa entre la velocidad normal de ultrasonidos de un elemento de madera deteriorado (condicionada por su pérdida de densidad) y su resistencia residual de rotura en flexión.
2. Para determinar la resistencia residual en flexión de un elemento de madera deteriorado se propone la siguiente ecuación:

$$MOR = 0,0502 V_N - 18,259 \quad R^2 = 0,65$$

siendo;

MOR    Tensión de rotura en flexión en N/mm<sup>2</sup>.  
V<sub>N</sub>    Velocidad normal de ultrasonidos en m/s.

## **VII.3. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS (DENSIDAD Y PÉRDIDA DE DENSIDAD) DE LA MADERA**

---

VII.3.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

VII.3.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA



### VII.3.1. ENSAYOS SOBRE MADERA SANA

Los resultados obtenidos de los ensayos con resistógrafo sobre madera sana han arrojado las siguientes conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación entre la densidad de la madera y las medidas realizadas con resistógrafo. De esta forma coincidimos con otros autores (Ceraldi, 2001; Lourenço et al., 2007; Acuña et al., 2010).
2. Para determinar la densidad de un elemento de madera en función de las medidas de resistógrafo se proponen una serie de correlaciones:

Correlación obtenida a partir de grandes probetas:

$$d = 18,046 \text{ RM} + 236,96 \quad R^2 = 0,58$$

Correlaciones obtenidas a partir de pequeñas probetas:

Pequeñas probetas de longitud variable

$$\begin{aligned} d &= 24,535 \text{ RM} + 210,34 & R^2 &= 0,70 \\ d &= 23,804 \text{ RM}' + 217,23 & R^2 &= 0,71 \end{aligned}$$

Pequeñas probetas de 20 mm de longitud

$$\begin{aligned} d &= 28,117 \text{ RM} + 146,6 & R^2 &= 0,68 \\ d &= 26,056 \text{ RM}' + 159,73 & R^2 &= 0,75 \end{aligned}$$

siendo en cada caso;

d	Densidad del elemento de madera en Kg/m <sup>3</sup>
RM	Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.
RM'	Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada descontando el primer tramo del perfil resistográfico coincidente con el desplazamiento de la aguja hasta penetrar en la madera

Los resultados obtenidos con pequeñas probetas permiten establecer correlaciones con unos mejores coeficientes de ajuste. Asimismo, en los ensayos con pequeñas muestras las correlaciones mejoran al descontar el primer tramo del perfil resistográfico, es decir, al relacionar la densidad con RM' (área del perfil resistográfico por unidad de longitud descontando el tramo de desplazamiento de la aguja antes de penetrar en la madera). El primer tramo del perfil resistográfico provoca una alteración sobre el área total bajo la curva por unidad de longitud, cambio que es más apreciable cuanto menor es la longitud de la probeta.

3. Asimismo, se ha propuesto una metodología de aplicación in situ de la técnica del resistógrafo. Esta metodología permite calibrar los perfiles resistográficos obtenidos en cada estructura particular de una obra de rehabilitación. Su principio se basa en la extracción de pequeñas muestras de 7 mm de diámetro y 20 mm de longitud de la propia estructura que proporcionen valores de densidad reales y permitan, por tanto, conseguir un mayor nivel de aproximación en los ensayos resistográficos. Basado en este principio general, se han planteado 2 perspectivas de análisis:

- Análisis global:

Este análisis se basa en desarrollar la curva de regresión propia de cada estructura. Para ello se realizan varias perforaciones y se extrae, en cada caso, una pequeña probeta en las proximidades de la sección sobre la que se toma el perfil resistográfico. A partir de estos datos se obtiene la correlación propia entre la densidad de la madera de dicha estructura ( $d$ ), obtenida de la pequeña muestra, y su medida de resistógrafo correspondiente ( $RM$ ), obtenida de cada perforación. La aplicación de esta correlación permite predecir el resto de valores de densidad de la estructura a partir de las medidas de resistógrafo.

Este método se fundamenta en el principio de que el número de probetas a extraer en una estructura debe ser limitado para reducir, en lo posible, los ensayos destructivos y conseguir, al mismo tiempo, una correlación fiable. Así, según los estudios realizados el número de probetas a extraer de la estructura debe aproximarse a 20.

- Análisis individual:

La metodología de análisis individual se basa en la calibración del perfil resistográfico utilizando el valor de densidad obtenido en cada caso a partir de la pequeña probeta. De esta manera el perfil resistográfico se transforma en un perfil de densidad.

Ambas metodologías de análisis presentan las siguientes ventajas:

- Ajustan los parámetros del equipo a la situación encontrada en la estructura: especie de madera y contenido de humedad.
- Se convierte en una metodología de ensayo no dependiente de los ensayos de calibración realizados en laboratorio e independientes de la estructura.

### VII.3.2. ENSAYOS SOBRE MADERA DETERIORADA

Los resultados obtenidos de los ensayos con resistógrafo sobre madera deteriorada han permitido extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha determinado que existe una relación entre la pérdida de densidad de la madera y las medidas realizadas con resistógrafo. Los ensayos realizados mediante resistógrafo permiten localizar la sección donde se ha producido el deterioro y cuantificar su pérdida de densidad.

$$\Delta d = 69,364 - 6,8352 RM \quad R^2 = 0,5015$$

Siendo;

$\Delta d$  Densidad del elemento de madera en Kg/m<sup>3</sup>.  
 $RM$  Medida de resistógrafo en Bits: área total bajo la curva resistográfica por unidad de longitud penetrada.



## **VII.4. CONCLUSIONES SOBRE EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE FORJADOS DE ENTREVIGADO CUAJADO A PARTIR DE ENSAYOS CON ULTRASONIDOS**

---

VII.4.1. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS

VII.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN



El análisis de la morfología de los forjados de entrevigado cuajado arroja las siguientes conclusiones:

1. La aplicación de las técnicas de inspección estudiadas en el presente trabajo a la morfología constructiva de los forjados de entrevigado cuajado plantea la necesidad de desarrollar una metodología específica de aplicación a este campo de inspección.
2. Se ha desarrollado un nuevo transductor de ultrasonidos con una morfología adecuada para acometer las labores de inspección de esta tipología constructiva. Las características de este nuevo palpador aúnan la morfología de los equipos ultrasonidos y el procedimiento operatorio del resistógrafo.

La aplicación de este dispositivo en la inspección de estos forjados implica realizar unas perforaciones en las vigas en las que introducir los cabezales del transductor.

#### VII.4.1. ENSAYOS REALIZADOS CON EL NUEVO TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS

Los ensayos realizados con el nuevo transductor han permitido extraer las conclusiones expuestas a continuación. Estos resultados sientan las bases de aplicación de este nuevo instrumental:

1. Las mediciones realizadas con el nuevo palpador apuntan a un retardo medio de **60,8  $\mu$ s** en las mediciones exteriores con respecto al valor de tiempo obtenido con el palpador tradicionalmente utilizado.
2. El análisis del palpador bajo la nueva configuración de ensayo, es decir, introduciendo los palpadores en el interior de las vigas, revela que no existen diferencias significativas en las velocidades obtenidas desde el exterior por lo que pueden despreciarse los efectos de transmisión por fuste.
3. Debido a las oscilaciones que pueden producirse en las mediciones debe limitarse el ancho mínimo de la viga susceptible de inspección mediante esta técnica. La variabilidad producida en las mediciones tiene un mayor efecto sobre las piezas de pequeña escuadría pudiendo ser interpretada como una pérdida de densidad. Por esta razón, se limita la aplicabilidad de la técnica a vigas con una escuadría igual o superior a 12 cm. La inspección de vigas de menor escuadría se reserva para otros métodos de inspección como puede ser el resistógrafo.

La justificación de esta escuadría mínima de ensayo viene determinada por la separación mínima requerida entre los transductores y por la configuración física del ensayo y viene dada por la siguiente expresión:

$$d = D - (2 \cdot a + 2 \cdot b) \quad (\text{mm})$$

siendo,

- |   |   |
|---|---|
| d | Distancia libre entre los palpadores en mm.   |
| D | Ancho de la viga en mm.   |
| a | Diámetro de la perforación necesaria para introducir el transductor, 6 mm.  |
| b | Separación mínima de la perforación del borde de la viga, 30 mm. Esta separación viene dada por la morfología de la viga que contiene unos bordes salientes donde apoya el entrevigado. |

Con todo ello resulta que la separación entre los transductores es:

$$d = D - (2 \cdot 6 + 2 \cdot 30) = \mathbf{D - 72 \text{ (mm)}}$$

Con estas limitaciones se ha ensayado la funcionalidad de la técnica para pequeñas escuadrías evaluando la separación mínima necesaria entre palpadores para obtener unos resultados fiables. Los resultados de los ensayos fijan que separaciones inferiores a 45 mm producen distorsiones en las mediciones.

- Se han establecido unos criterios de diagnóstico de velocidades normales en función de la separación entre transductores. Estos criterios vienen expresados en intervalos de tiempo de transmisión de la onda ultrasónica para cada uno de los estadios de deterioro:

Separación entre transductores: 5 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro: pérdida de densidad 0-30%	Madera deteriorada: pérdida de densidad >30%
< 102,4 $\mu$ s	102,4 – 144,1 $\mu$ s	> 144,1 $\mu$ s

Separación entre transductores: 6 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro: pérdida de densidad 0-30%	Madera deteriorada: pérdida de densidad >30%
< 110,8 $\mu$ s	110,8 – 160,8 $\mu$ s	> 160,8 $\mu$ s

Separación entre transductores: 7 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro: pérdida de densidad 0-30%	Madera deteriorada: pérdida de densidad >30%
< 119,1 $\mu$ s	119,1 – 177,4 $\mu$ s	> 177,4 $\mu$ s

Separación entre transductores: 8 cm

Madera sana	Madera con inicio de deterioro: pérdida de densidad 0-30%	Madera deteriorada: pérdida de densidad >30%
< 127,4 $\mu$ s	127,4 – 194,13 $\mu$ s	> 194,13 $\mu$ s

#### VII.4.2. PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A LA INSPECCIÓN DE FORJADOS CON ENTREVIGADO CUAJADO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN

- Con las limitaciones reseñadas y a partir de los nuevos criterios de diagnóstico se ha planteado una propuesta metodológica mediante ensayos de ultrasonidos aplicada a la inspección de forjados con entrevigado cuajado en obras de rehabilitación. Esta propuesta queda recogida en las siguientes fichas de inspección:

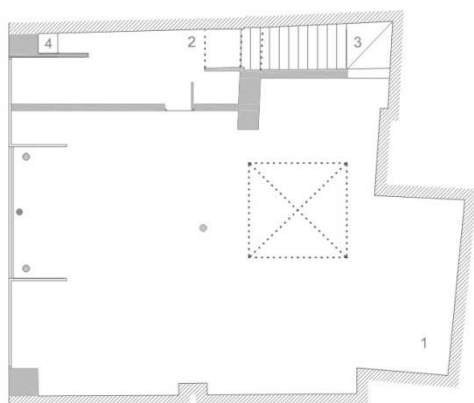
OBRA		Fecha inspección	
------	--	---------------------	--

### DATOS PREVIOS DE LA EDIFICACIÓN

#### DESCRIPCIÓN

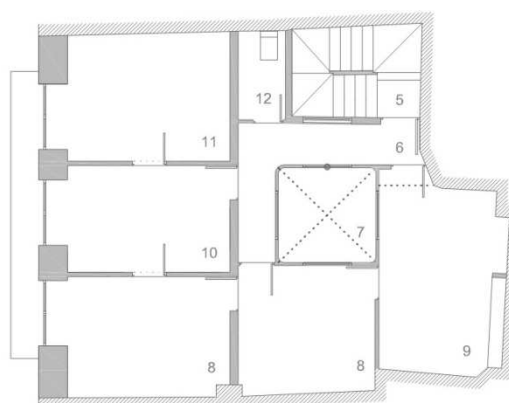
Situación			
Nº de plantas			
Sistema constructivo		Año construcción	

#### PLANIMETRÍA Y ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LA EDIFICACIÓN



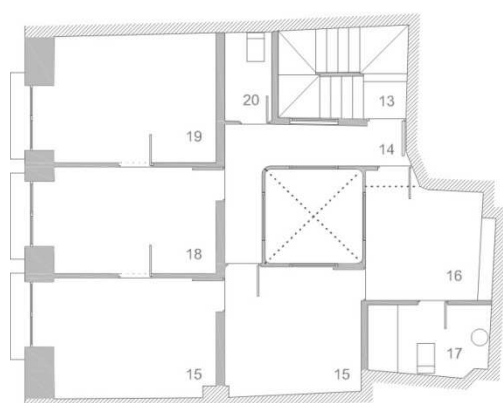
PLANTA BAJA

- 1 Local comercial
- 2 Vestíbulo de entrada
- 3 Comunicación
- 4 Armario de instalaciones



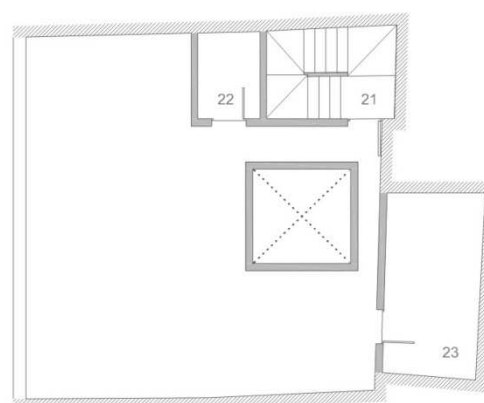
PLANTA PRIMERA / SEGUNDA

- 5 Comunicación
- 6 Vestíbulo de entrada
- 7 Patio
- 8 Sala de estar
- 9 Cocina
- 10 Dormitorio 1
- 11 Dormitorio 2
- 12 Baño



PLANTA TERCERA

- 13 Comunicación
- 14 Vestíbulo distribuidor
- 15 Sala de estar
- 16 Cocina
- 17 Baño 1
- 18 Dormitorio 1
- 19 Dormitorio 2
- 20 Baño 2




PLANTA CUBIERTA

- 21 Comunicación
- 22 Trastero 1
- 23 Trastero 2

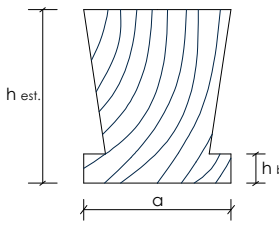


### DATOS PREVIOS DE LOS FORJADOS DE MADERA A INSPECCIONAR

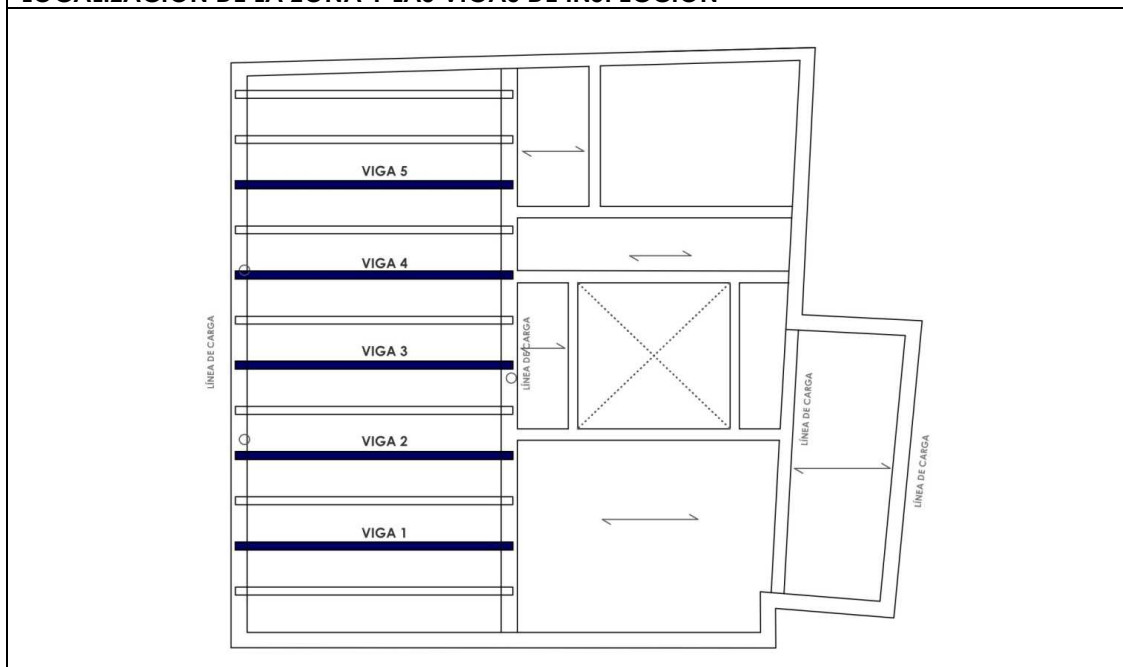
LOCALIZACIÓN	Planta nº
	Habitación
LESIONES	
PLANIMETRÍA Y ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LESIONES	
 <p>The four photographs show different views of wooden joists in a ceiling. The top-left photo shows a joist with significant white, fibrous decay. The top-right photo shows a joist with a dark, possibly metal, support or fastener. The bottom-left photo shows a joist with a yellow support rod. The bottom-right photo shows a joist with a patterned fabric or paper covering it.</p>	
<p>* Ejemplos de forjado de entrevigado cuajado con lesiones</p>	

## INSPECCIÓN DE LOS FORJADOS DE MADERA

### CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL FORJADO

Luz de las vigas (m)	4,00	Entrevigado (m)	0,50
	Escuadría (cm)	Inferior, a (cm)	12,50
		Altura base, h <sub>base</sub> (cm)	4,00
		Altura estimada, h <sub>est</sub> (cm)	18,00

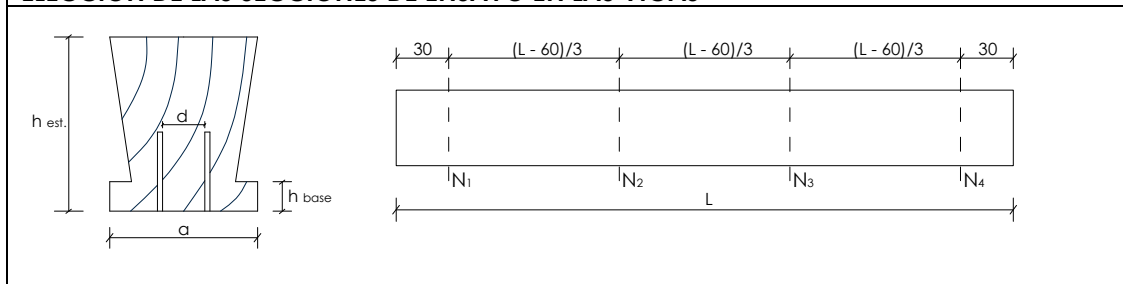
### LOCALIZACIÓN DE LA ZONA Y LAS VIGAS DE INSPECCIÓN



### MÉTODO DE INPECCIÓN APLICABLE

Separación libre máxima entre palpadores en cm, $d = (a - 7,20)$ :	5,30
Resistógrafo	
Ultrasonidos	X

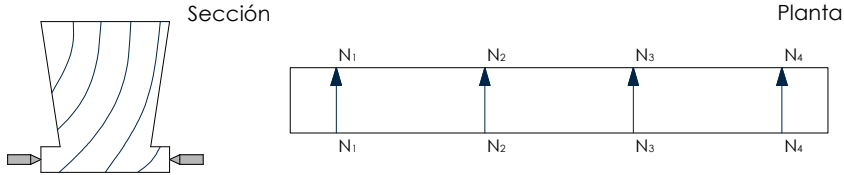
### ELECCIÓN DE LAS SECCIONES DE ENSAYO EN LAS VIGAS



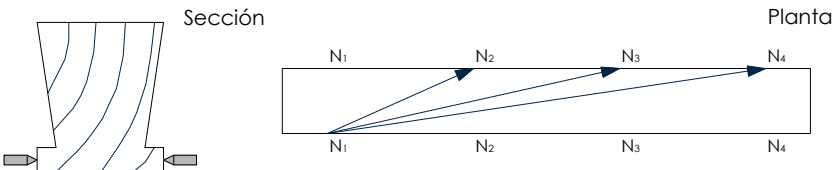
## VIGA N° n

## MEDIDAS EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

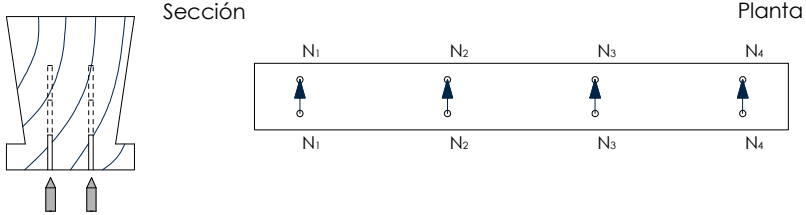
			
Sección	Separación(a)(m)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>			
N <sub>2</sub>			
N <sub>3</sub>			
N <sub>4</sub>			

## Longitudinales cruzadas

			
Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>			
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>			
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>			

## MEDIDAS INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

				
Sección	Prof. (cm)	Separación ( m)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	3			
N <sub>1</sub>	6			
N <sub>1</sub>	9			
N <sub>2</sub>	3			
N <sub>2</sub>	6			
N <sub>2</sub>	9			
N <sub>3</sub>	3			
N <sub>3</sub>	6			
N <sub>3</sub>	9			
N <sub>4</sub>	3			
N <sub>4</sub>	6			
N <sub>4</sub>	9			



2. La metodología de inspección referida se encuentra actualmente en proceso de desarrollo. Los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio pronostican un avance favorable para su aplicación in situ en obras de rehabilitación. No obstante, deben señalarse las limitaciones que ofrece hoy día la técnica derivada de la morfología de los equipos empleados:
  - Diámetro de perforación elevado. El diámetro necesario para albergar los transductores de ultrasonidos es de 0,6 cm. Aunque se prevé en cada caso rellenar las perforaciones mediante tacos de madera debe trabajarse en la reducción del diámetro de los transductores para lograr reducir el diámetro de estas perforaciones. El objetivo es poder asimilar estas perforaciones a las realizadas con otros equipos de ensayo empleados actualmente como el resistógrafo, equipo que realiza una perforación en la viga de 0,3 cm.
  - Oscilación en las mediciones. Aunque se consiguen mediciones estables debe mejorarse el acople o estudiar un método de aislamiento del fuste para facilitar su aplicación en obra.

Con todo ello, debe concluirse que en un futuro debe trabajarse en el perfeccionamiento de los equipos empleados. Es fundamental conseguir disminuir el diámetro de perforación de modo que pueda considerarse una metodología de inspección cuasi no destructiva.



## **VII.5. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE VIGAS**

---

### **VII.5.1. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS**

### **VII.5.2. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS**



### VII.5.1. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS REFORZADAS

Las conclusiones referidas a continuación suponen un primer avance sobre el estudio de los refuerzos realizados a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Los ensayos realizados y los resultados obtenidos sientan las bases del desarrollo de futuras investigaciones.

Con todo ello, los resultados de los ensayos realizados permiten concluir:

1. Los refuerzos realizados a partir de placas realizadas con fibra de vidrio y resina de poliéster permiten alcanzar una eficacia estructural de las probetas reparadas con respecto a las probetas sanas próxima o superior a la unidad por lo que se muestran como una buena alternativa a las reparaciones y/o refuerzos realizados con perfiles de acero o madera.
2. Es necesario hacer un estudio sobre la longitud de anclaje y refuerzo necesaria de la placa para conseguir un máximo aprovechamiento. La experiencia práctica de los ensayos realizados arroja las siguientes conclusiones:
  - a. Ensayos de cortante: Para las probetas ensayadas (con una escuadría de 50 mm y una longitud de 725 mm), la longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2h (100 mm). Esta longitud está referida al punto de aplicación de la carga en el ensayo.
  - b. Ensayos de flexión: Para las probetas ensayadas a flexión (escuadría de 45x45x900 mm y 50x50x1000 mm), la longitud de anclaje más eficaz ha resultado ser 2,2h (100 mm). Esta longitud debe aplicarse a ambos lados de los puntos de aplicación de la carga en el ensayo de flexión realizado con 2 puntos de carga.

Ambos ensayos no corresponden a situaciones de carga reales. No obstante, los diagramas de esfuerzos derivados del procedimiento operatorio de estos ensayos son más desfavorables que los diagramas que resultan de una situación real (Capítulo VI.5.4.1).

### VII.5.2. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN APORTADA PARA LA REPARACIÓN DE EMPOTRAMIENTOS DE VIGAS

El estudio económico de la solución permite extraer las siguientes conclusiones:

1. La valoración económica de la solución aportada ha revelado una importante reducción de su coste de ejecución (un 50% aproximadamente) frente al actual sistema Beta, ampliamente extendido en el campo de la reparación de forjados de madera.
2. La causa fundamental del abaratamiento de esta solución frente al Sistema Beta reside en el empleo de una prótesis de madera, de similares características a la madera usada en la estructura, en sustitución del relleno de mortero epoxi.



## COROLARIO

---

Tal y como se planteaba en los objetivos de este trabajo, se ha aportado un estudio que permite acotar y actualizar el uso de las técnicas no destructivas o cuasi no destructivas (termografía de infrarrojos, mediciones de transmisión de ondas ultrasónicas y resistógrafo) para la inspección de forjados y estructuras de madera.

Asimismo, se ha desarrollado un instrumental y se ha aportado una metodología para la aplicación de la técnica de ultrasonidos a la inspección de la tipología de forjados de entrevigado cuajado.

De cualquier forma este trabajo está implícito en una línea de investigación que debe seguir desarrollándose con trabajos futuros. Para ello se ha iniciado el estudio de una técnica complementaria de refuerzo mediante placas fabricadas a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Este sistema sienta las bases de investigaciones futuras encaminadas a desarrollar un proceso de industrialización del sistema que permita su abaratamiento y puesta en obra.





# REFERENCIAS

- 1. CONSTRUCCIÓN EN MADERA**
- 2. DISEÑO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE MADERA**
- 3. CARACTERIZACIÓN Y/O EVALUACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL**
- 4. INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURAS DE MADERA. SOLUCIONES DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA**
- 5. OTROS**



## **1. CONSTRUCCIÓN EN MADERA**

### **1.1. LIBROS**

Alfonso Lozano, Martínez Luengas. *"Entramados horizontales de madera en la vivienda popular"*. Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. pp 332-337.

Aguilar García, D. *"La carpintería mudéjar en los tratados"*. Curso monográfico de doctorado. Universidad de Málaga. (1984).

Casinello Pérez, F. *"Construcción. Carpintería"*. Editorial Rueda. Madrid (1993).

Fray Lorenzo de San Nicolás. *"Arte y uso de Architectura"*. (1639).

García Salinero, F. *"Léxico de alarifes de los siglos de oro"*. Real Academia Española. Madrid (1968).

López de Arenas, D. *"Breve compendio de la Carpintería de lo blanco y Tratado de Alarifes"*. (1633). Cuarta edición por Guillermo Sánchez Lafler. Madrid.

Lozano Apolo, G., Lozano Martínez-Luengas, A. *"Curso de técnicas de intervención en el patrimonio arquitectónico. Tomo I. Reestructuración en madera"*. Consultores técnicos de construcción. Imprenta Mercantil Asturias S.A. (1995).

Moya Blanco, L. *"Cuaderno de Apuntes de Construcción de Luis Moya Blanco. Curso 1924-1925. Edición a cargo de Javier García-Gutierrez Mosteiro. Instituto Juan de Herrera. ETSA de Madrid. U.P.M. Madrid (1993).*

Nuere, E. *"La carpintería de lo blanco: lectura dibujada del primer manuscrito de Diego López de Arenas"*. Ministerio de Cultura. Madrid (1985).

Nuere, E. *"La carpintería de lazo: lectura dibujada del manuscrito de Fray Andrés de San Miguel"*. Colegio de Arquitectos de Andalucía Oriental. Málaga (1980).

Nuere, E. *"La carpintería de armar española"*. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Madrid (1989).

Pijoan, J. *"El estilo mudéjar en los techos españoles del SXVI"*. Hojas selectas. Barcelona (1916).

Rafols, JF. *"Techumbres y artesonados españoles"*. Barcelona (1945).

Rodrigo Álvarez. *"Breve Compendio y Tratado de lo Blanco"* (1674).

Torres Balbás, L. *"El más antiguo alfarje conservado en España"*. Al Andalus IX (1944).

## **2. DISEÑO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE MADERA**

### **2.1. NORMATIVA**

Código Técnico de la Edificación (CTE). Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda. 2006.

### **2.2. LIBROS**

Argüelles, R. *"Curso de diseño y cálculo de estructuras de madera"*. COLEGIO OFICIAL DE ARQUITECTOS MADRID (1988). 176 págs. ISBN: 9788477400158.

Arriaga Martitegui, F. *"Estructuras de madera. Diseño y cálculo"*. AITIM (2000). 674 págs. ISBN: 9788487381171.

Peraza Sánchez, F. *"Protección preventiva de la madera"*. AITIM (2001). 437 págs. ISBN: 9788487381227.

### **3. CARACTERIZACIÓN Y/O EVALUACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL**

#### **3.1. NORMATIVA**

##### **3.1.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN**

###### **3.1.1.1. Clasificación visual**

UNE 56544:2007. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas".

UNE 56546:2007. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas".

UNE EN 844-1:1996. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos generales comunes a la madera aserrada y a la madera en rollo".

UNE EN 844-2:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos generales relativos a la madera en rollo".

UNE EN 844-3:1996. "Madera serrada y madera en rollo. Terminología, términos generales relativos a la madera aserrada".

UNE EN 844-4:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos al contenido de humedad".

UNE EN 844-5:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las dimensiones de la madera en rollo".

UNE EN 844-6:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las dimensiones de la madera aserrada".

UNE EN 844-7:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a la estructura anatómica de la madera".

UNE EN 844-8:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las singularidades de la madera en rollo".

UNE EN 844-9:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las singularidades de la madera aserrada".

UNE EN 844-10:1998. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a los hongos cromógenos y a otros ataques por hongos".

UNE EN 844-11:1998. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos relativos a las degradaciones originadas por los insectos".

UNE EN 844-12:2001. "Madera aserrada y madera en rollo. Terminología, términos complementarios e índice general".

UNE EN 1309-1:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones. Parte 1: madera aserrada".

UNE EN 1309-2: 2007. "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las dimensiones. Parte 2: madera en rollo".

UNE EN 1310:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades".

UNE EN 1311:1998. "Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las alteraciones biológicas".

UNE EN 1313-1:2010. "Madera aserrada y madera en rollo. Dimensiones recomendadas y desviaciones admisibles. Parte 1: Madera aserrada de coníferas".

UNE EN 1313-2:1999. "Madera aserrada y madera en rollo. Dimensiones recomendadas y desviaciones admisibles. Parte 2: Madera aserrada de frondosas".

### 3.1.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

UNE 56528:1978. "Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos".

UNE 56531:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico".

UNE 56532:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la higroscopicidad".

UNE 56533:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica".

UNE 56534:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la dureza".

UNE 56535:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión axial".

UNE 56536:1977. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión dinámica".

UNE 56537:1979. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática".

UNE 56538:1978. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra".

UNE 56539:1978. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la hienda".

UNE 56540:1978. "Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos".

UNE 56541:1977. "Determinación de la estabilidad dimensional de la madera tratada con productos protectores e hidrófugos".

UNE 56542:1988. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras".

## REFERENCIAS

UNE 56543:1988. "Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del esfuerzo cortante".

UNE EN 336:2003. "Madera estructural. Dimensiones y tolerancias".

UNE EN 338:2010. "Madera estructural. Clases resistentes".

UNE EN 384:2010. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad".

UNE EN 408:2011. "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada para uso estructural, determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

UNE EN 1312:1997. "Madera aserrada y madera en rollo. Determinación del volumen de un lote de madera aserrada".

UNE EN 1912:2005. "Madera estructural. Clases resistentes, asignación de calidades visuales y especies".

UNE EN 13183-1:2002. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada- Parte1: Determinación por el método de secado en estufa".

UNE EN 13183-2:2002. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada- Parte2: estimación por el método de la resistencia eléctrica".

UNE EN 13183-3:2006. "Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada- Parte3: estimación por el método capacitivo".

UNE EN 13556:2004. "Madera aserrada y madera en rollo. Nomenclatura de las maderas en Europa".

UNE EN 14081-1:2006. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte1: Requisitos generales".

UNE EN 14081-2:2010. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el ensayo inicial de tipo".

UNE EN 14081-3:2005. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Equipo de clasificación. Especificaciones adicionales para el control de la producción en fábrica".

UNE EN 14081-4:2009. "Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Equipo de clasificación con sistema controlado automáticamente".

## 3.2. LIBROS

### 3.2.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN

Kasal, B., Tannert T., *"In Situ Assessment of Structural Timber (RILEM State-of-the-Art Reports)"*. SPRINGER (2010). ISBN: 940070559X

#### 3.2.1.1. Clasificación visual

#### 3.2.1.2. La técnica de ultrasonidos

Bucur, V. *"Acoustics of wood"*. SPRINGER (2006). 452 págs. ISBN: 9783540305941.

Rodríguez Liñán, C, Rubio de Hita, P. *“Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos”*. Sevilla. Universidad de Sevilla (2000). 165 págs. ISBN: 8447206572.

### **3.2.1.3. La termografía de infrarrojos**

Bucur, V. *“Nondestructive characterization and Imaging of Wood”*. SPRINGER (2003). 354 págs. ISBN: 35404381408.

## **3.3. CAPÍTULOS DE LIBROS**

### **3.3.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN**

#### **3.3.1.1. Clasificación visual**

#### **3.3.1.2. La técnica de ultrasonidos**

#### **3.3.1.3. La termografía de infrarrojos**

Masuda M, Fujimoto K, Takino S, Sadoh T (1995). “Change of thermal images of timber including knots under repeated bending”. Bull Kyoto University. For 67:167-173.

Masuda M, Takahashi S (1998). Change of thermal images of lumber including knots, finger joints and metal connectors. Bull Kyoto University. For 69:114-128.

#### **3.3.1.4. El resistógrafo**

Lear G., Kasal, B; Anthony, R (2011). “Resistance drilling”. In situ Assessment of Structural Timber. RILEM State of the Art Reports. Ed. Bohumil Kasal and Thomas Tannert, Springer.

Tannert T. “Drill resistance”. In Assessment of timber structures. COST E 55 Report. Ed. Phillip Dietsch and Jochen Köhler, Shaker Verlag.

### **3.3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA**

## **3.4. TESIS DOCTORALES**

### **3.4.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN**

Iñiguez González, G. *“Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas estructural de gran escuadría para uso estructural”*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2007).

#### **3.4.1.1. Clasificación visual**

#### **3.4.1.2. La técnica de ultrasonidos**

Bucur, V. *Ondes ultrasonores dans le bois. Caractérisation mécanique et qualité de certaines essences de bois*. Thèse de Doc. Ing. ISMCM, Saint-Ouen (1984.).

Rubio de Hita, P. *“Evaluación del estado de la madera, en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos”*. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (1997).

Sandoz, J.L. *“Triage et Fiabilité des bois de construction. Validité de la methode ultrason”*. Ecole Polytechnique Federale de Lausana (1990).

### 3.4.1.3. La termografía de infrarrojos

### 3.4.1.4. El resistógrafo

Gantz, C. "Evaluating the efficiency of the resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species". North Carolina State University. Department of Forestry (2002).

## 3.4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

Conde García, M. "Caracterización de la madera estructural de *Pinus nigra* Subsp. *Salzmannii*". Universidad Politécnica de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2005).

Esteban Herrero, M. "Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera". Universidad Politécnica de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2003).

Hermoso, E. "Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L". Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes (2001).

## 3.5. ARTÍCULOS DE REVISTAS

### 3.5.0. GENERALIDADES

Esteban Herrero, M., Argüelles Álvarez, R., Arriaga Martitegui, F., Iñiguez González, G., Bobadilla Maldonado, I. "Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. Madrid, Abril-Junio (2007). pp. 15-27.

Piqueras Haba, J., Sanchos Deusa, C. "El transporte fluvial de madera en España", *Cuaderno de Geografía*. Vol. 69/70. Valencia (2001). pp. 127-162.

### 3.5.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN

Basterra, L.A., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, G., López, G. "Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid)". *Informes de la Construcción*. Vol. 61. Nº 516. Madrid, Octubre-Noviembre (2009). pp. 21-36.

Lourenço, P., Feio, A., Saporiti Machado, J. "Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood". *Construction and Building Materials*. Vol. 21 (2007). pp. 1617-1627.

Wang S-Y., Chen J-H, Tsai M-J, Lin C-J, Yang T-H. "Grading of softwood lumber using non-destructive techniques". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 208. (2008). pp. 149-158.

#### 3.5.1.1. Clasificación visual

Díez, R., Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., Roskopf, S. "Clasificación visual de madera estructural de Pino Laricio (*Pinus Nigra* Arnold): Comparación de resultados usando las normas UNE 56544 y DIN 4074". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 9. Nº 2. (2000). pp. 375-380.



### 3.5.1.2. La técnica de ultrasonidos

Acuña, L., Díez, M.R., Casado, M. "Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus Pinaster Ait*". *Boletín del CIDEU. Comunicación invitada*. ISSN: 1885-5237. Vol. 2. (2006). pp. 7-26.

Acuña, L., Renedo, F., Casado, M., Lázaro, T. "Efecto de la procedencia de la madera estructural de *Pinus Pinaster Ait*. en la clasificación mediante la técnica de ultrasonidos".

Aggour, M. S., Ragab, A.M., E.J. White J.R. "Determination of In-Place Timber Piling Strength". *Transportation Research Record*. Nº 962. (1984). pp. 69-77.

Arita, K., Kuratani, K. "Wooden Pole Tester for Determining Strength of Decayed Wooden Poles". *Journal Transportation Research*. July (1984). pp. 167-173.

Arriaga, F. et al. "Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera". *Revista AITIM*. Nº 161. Noviembre (1992). pp. 51-59.

Arriaga, F. Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J.I. "Structural Tali Timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods". *Holz als roh-und werkstoff*. Vol. 64. (2006). pp. 357-362.

Beall, F.C. "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties". *Wood science and technology*. Vol. 36. (2002). pp. 197-212.

Beall, F.C., Biernacki, J.M., Lemaster, R.L. The use of acousto-ultrasonics to detect biodeterioration in utility poles. *Journal Acoustic Emission*. Vol. 12. (1994). pp. 55-64.

Bucur, V. "Acoustics as a tool for the nondestructive testing of wood". *NDT*. Vol. 4. Nº11. Noviembre (1999). pp. 22-26.

Conde García, M., Fernández-Golfín Seco J.I., Hermoso Prieto, E. "Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual". *Materiales de la Construcción*. Vol. 57. Nº 288. Madrid, Octubre-Diciembre (2007). pp. 49-59.

Feeney, F.E, Chivers, R.C., Evertsen J.A., Keating, J. "The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood". *Ultrasonics*. Vol. 36. (1998). pp. 449-453.

Goia R. de Oliveira, F., Anadia O. de Campos, J., Sales, A. "Ultrasonic Measurements in Brazilian Hardwood". *Materials Research*. Vol. 5. Nº 1. Sao Carlos, January-March (2002). DOI: 10.1590/S1516-14392002000100009.

Hermoso Prieto, E., Fernández-Golfín Seco, J.I., Díez Barra, M., Mier Pérez, R. "Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. Madrid, Abril-Junio (2007). pp. 87-95.

Íñiguez González, G., Arriaga Martitegui, F., Esteban Herrero, M., Argüelles Álvarez, R. "Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural". *Informes de la Construcción*. Vol. 59. Nº 506. Madrid, Abril-Junio (2007). pp. 97-105.

Kabir, M.F. "Prediction of ultrasonic properties from grain angle". *Journal of the Institute of Wood Science*. Vol. 15. Nº 5. Summer (2001). ISSN 0020-3203.

Kabir, M., Schmoldt, D., Araman, P., Schafer, M. "Classifying defects in pallet stringers by ultrasonic scanning". *Wood and fiber science*. Vol. 35. Nº 3. (2003). pp. 341-350.

Kamioka H. "Effects of Ultrasonic Bonding Material on Velocity and Attenuation of Sound in Red Lauan Wood". *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. XXVII. Nº 2 (1988). pp. 188-191.

Kazemi Najafi, S., Abbasi Marasht, A., Ebrahimi, G. "Prediction of ultrasonic wave velocity in particleboard and fiberboard". *Journal Materials Science*. Vol. 42. January (2007). pp. 789-793. DOI 10.1007/s10853-006-1454-0.

Laffarga Ostert, J. "Aplicación de la propagación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas".

Rajeshwar, B., Bender, D.A., Bray, D.E., McDonald, K.A. "An Ultrasonic Technique for Predicting Tensile Strength of Southern Pine Lumber". *American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 40. Nº 4. (1997). pp. 1153-1159.

Sandoz, J.L. "Grading of construction timber by ultrasound". *Wood science and technology*. Vol. 23. (1989). pp. 95-108.

Sandoz, J.L. "Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading". *Wood science and technology*. Vol. 27. (1993). pp. 373-380.

Tanasoiu, V., Miclea, C., Tanasoiu, C. "Nondestructive testing techniques and piezoelectric ultrasonics transducers for wood and built in wooden structures". *Journal of optoelectronics and advance materials*. Vol. 4. Nº 4. December (2002). pp. 949-957.

Tiitta, M.E., Beall, F.C., Biernacki, J.M., "Classification study for using acoustic-ultrasonic to detect internal decay in glulam beams". *Wood science and technology*. Vol. 35. (2001). pp. 85-96.

Tíscar, P.A., Ruíz, M.A. "Evolución de la estructura de un monte de *Pinus Nigra* de la Sierra de Cazorla durante 100 años de ordenación". Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Tomikawa, Y. et al. "Non Destructive Inspection of Rotted Termite Damage Wooden Poles by Ultrasound" *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. XXIV. Supplement 24-1. (1985). pp. 187-189.

Wayne, W., Wilcox, W. "Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity". *Forest Products Journal*. Vol. XXXVIII. Nº 5. (1988). pp. 68-73.

Yang, Y., Hee, K., Hsu, D., Kim, S., Soug, S., Cho, H., Park, J., Kim, Y. "On Nondestructive Evaluation of Wood Materials Using Ultrasonic Techniques". *Key Engineering Materials*. Vol. 297-300. Switzerland, November (2005). pp. 1973-1978.

### 3.5.1.3. La termografía de infrarrojos

Abedi J., Banerjee, S. "Infrared Thermographic Mapping of Wood Surface Moisture During Drying". Institute of Paper Science and Technology, Atlanta (1999).

Busse, G. "Imaging with optically generated thermal waves". *Physical Acoustics*. Vol. XXII. Academic Press, New York (1988). pp. 403-478.

Busse, G. "Nondestructive evaluation of polymer materials". *NDT Evaluation Int*. Vol. 27. Nº 5. (1994). pp. 253-262.

Gilberg, M., Riegel, C., Melia, B., Leonard, J. "Detecting subterranean termite activity with infrared thermography: A Case Study". *APT Bulletin*. Vol. 34, Nº 2/3. (2003). pp. 47-53.

Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A., Caner-Saltik, E.N. (2007). "In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity". *Infrared Physics & Technology*. Vol. 49. (2007). pp 243-248.

Ludwig, N., Redaelli, V., Rosina, E., Augelli, F. "Moisture detection in wood and plaster by IR thermography". *Infrared Physics & Technology*. Vol 46. (2004). pp 161-166.

Luong, MP. "Mechanical performance of wooden construction materials". Ecole Polytechnique. France (1996).

Mattone, M. "Use of Non-Destructive tests in the evaluation of the state of repair of consolidation interventions on wooden structures". Politecnico di Torino, Department of Architecture. Italy (2000).

Niemz P. "Methods of non-destructive wood testing". *Wood Physics*. (2006).

Wyckhuyse, A., Maldague, X. "A study of Wood Inspection by Infrared Thermography. Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography". *Research in Nondestructive Evaluation*. Vol 13. Edición 1 (2001). pp. 1-12.

Wyckhuyse, A., Maldague, X. "Wood Inspection by Infrared Thermography, Part II. Thermography for Wood Defects Detection". *Research in Non destructive Evaluation*. Vol 13. Edición 1 (2001). pp. 13-21.

#### 3.5.1.4. El resistógrafo

Acuña L., Basterra, L.A., Casado, M.M., López G., Ramón-Cueto, G., Relea, E., Martínez, C., González, A. "Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera". *Materiales de la Construcción*. (2010). DOI:10.3989/mc2010.57610.

Ceraldi, C., Mormone, V., Russo Ermolli, E. "Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics". *Materials and Structures*. Vol. 34 January-February (2001). pp 59-64.

Calderoni, C., De Matteis, G., Giubileo, C., Mazzolani, F.M. "Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements". *Engineering Structures*. (2009). DOI:10.1016/j.engstruct.2009.10.006.

Costello, L., Quarles, S. "Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the resistograph and the portable drill". *Journal of Arboriculture*. Vol. 25. Nº 6. November (1999).

Fikret Isik and Baillian Li. "Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs". *Canadian Journal Forest Research*. Vol. 33. (2003). pp 2426-2435.

#### 3.5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

Díez, M.R., Fernández-Golfín, J.I., Hermoso, E. "Causas de las deformaciones en madera estructural de *Pinus nigra*". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 10. Nº 2 (2001). pp. 245-252.

Fernández-Golfín, J.I. Díez, M.R. "Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 3. Nº 2. (1994). pp. 211-219.

Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Baonza, M.V., Gutiérrez, A., Hermoso, E., Conde, M., Van den Eynde, V. "Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de Pino Laricio (*Pinus nigra* Arn. *Salzmannii*)". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 10. Nº 2. (2001). pp. 311-331.

Hermoso, E., Carballo, J., Fernández-Golfín J.I. "Caracterización estructural de la madera de *Pinus Radiata* D. Don del País Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas". *Ciencia y Tecnología*. Vol. 9. Nº 3. (2007). pp. 223-232.

Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, R. "Análisis del factor de altura  $K_H$  en la madera aserrada estructural de Pino Silvestre". Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA). Madrid.

Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R. "Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica". *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales*. Vol. 11, Nº 2. (2002). pp. 425-440.

Mier, R., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Hermoso, E., Iñiguez, G., Conde, M. "Caracterización mecánica de madera en rollo delgada de Pino Laricio de Cuenca". Laboratorio de Ensayos de Madera Estructural (CIFOR-INIA).

### 3.6. CONGRESOS

#### 3.6.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN

Basterra, L.A., Ramón, G., Barranco, I., López, G., Acuña, L., Relea, E., Casado, M. "Avance de propuestas metodológicas para el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas". *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Cádiz. 27-29 enero 2005.

Casado, M. "Determinación de la capacidad resistente de madera estructural de *Pinus Sylvestris* mediante PLG". *XI Congreso Español de END*. Gijón. 4-5 Julio de 2007.

Palaia, L. "Structural failure analysis of timber floors and roofs in ancient buildings at Valencia (Spain)". *ICOMOS IWC- XVI International Symposium, Florence, Venice and Vicenza*, 11-16 November 2007.

Palaia, L, Monfort J, Sánchez R, Gil L, Álvarez A, López V, Tormo S, Pérez C, Navarro, P. "Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones". *9<sup>th</sup> International Conference on NDT of Art*, Jerusalem Israel, 25-30 May 2008.

##### 3.6.1.1. Clasificación visual

##### 3.6.1.2. La técnica de ultrasonidos

Aggour, M. S. et al. "Nondestructive Evaluation of Timber Bridge Piles". *Conference Nº 08784. Structures Congress. New Orleans. 15-18 September 1986*. ASCE, New York USA (1986). pp. 82-95.

Lee I.D.G. "Testing for Safety in Timber Structures Paper 12". *Symposium of Nondestructive Testing of Concrete and Timber*. Inst. of Civil Engineers London (1969). pp. 115-118.

Navarrete, A. , Troya, M.T. "Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques". *25<sup>th</sup> Annual Meeting Bali, Indonesia*. 30 May-3 June 1994.

Palaia, L., Galvan, V. et al. "Estimación de la residencia de la madera en edificios antiguos por medio de técnicas ultrasónicas". *Primer Congreso Nacional de Tecnología en la Arquitectura*. E.T.S.A. de Madrid. Noviembre de 1994.

Sandoz, J.L. "Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications". *10<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Lausanne CH. 26-28 Septiembre de 1996.

Bertoldo, C. "Assessment of wood quality by tree evaluation using ultrasound". *XIII World Forestry Congress*. Buenos Aires. 18-23 Octubre de 2009.

Dzbencki, W. "Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees". *COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products*. Warsaw. 15-17 Octubre de 2007.

Sandoz, J.L. "Non destructive evaluation of building timber by ultrasound". *8th International Non Destructive Testing of Wood Symposium*. Vancouver, WA, USA. 23-25 Septiembre de 1991.

Sandoz, J.L. "Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing". *9th International Non Destructive Testing of Wood Symposium*. Madison, WI, USA. 22-24 Septiembre de 1993.

Sandoz J.L. "Timber log grading using ultrasound, the Swiss example". *11th International Symposium on NDT of Wood*. Madison, WI, USA. 9-11 Septiembre de 1998.

Vary, A. *The Acousto-Ultrasonic Approach, Acousto-Ultrasonics, theory and Application*, J. C. Duke, Jr. Ed., Virg. Polytech. Inst. and State University, Blacksburg, Virginia. 1987.

#### 3.6.1.3. La termografía de infrarrojos

James, K., Rice, D. "Finding termites with thermal imaging". *Inframation, the thermographer's conference*. 2002.

Meinlschmidt, P. "Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials". *14th International Symposium on non-destructive testing of wood*. Hannover (Germany), 2005.

Tanaka, T. "Wood inspection by thermography". *Wood NTD-2000 – 12th International Symposium on non-destructive testing of wood*. Vol 6. Nº 03. 2000.

#### 3.6.1.4. El resistógrafo

Álvarez, L., Basterra, A. "Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructuras de madera". *I Jornadas de Investigación en Construcción*. Tomo I. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Henriques, D., Nunes, J.L., Saporiti Machado, J., De Brito, J. "Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn and Resistograph". *International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Porto Portugal, 12-15 April 2011.

Rinn, F. "Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from RESISTOGRAPH micro-drillings". *9th International Symposium on Non Destructive Testing of Wood*. Wisconsin (USA), 22-24 September 1993.

Rinn, F. "One minute pole inspection with RESISTOGRAPH micro drillings". *International Conference on wood poles and piles*. Fort Collins Colorado, 21-23 March 1994.

Tseng, Y. J., Hsu, M. F. "Evaluating the Mechanical Properties of Wooden Components Using Drill Resistance Method". In *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering*, pp 303-310. Miyazaki, Japan. 2-5 June 2008.

## **4. INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURAS DE MADERA. SOLUCIONES DE REPARACIÓN Y/O REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE MADERA**

### **4.1. LIBROS**

Arriaga, F., Peraza, F., Esteban M., Bobadilla, I., García, F. "Intervención en estructuras de madera". AITIM (2002). 464 págs. ISBN: 84-873-8124-3.

Bonamini, G., Noferi, M., Togni, M., Uzielli, L. "Il Manuale del Legno Strutturale". Vol. I-V. Mancosu Editore. Roma (2001).

Cigni, G. et al. "Nuove tecniche di consolidamento di travi in legno" . Edizione Kappa. Roma (1981).

Méndez Baliela, M. "Rehabilitación de estructuras antiguas de madera en edificios". Trabajo tutorado por el profesor Giambattista de Tommasi del Politécnico de Bari (Italia) para el Master Europeo de Ingeniería de la Construcción 1993-1994. Universidad de Cantabria. (1993-1994). 90 páginas.

Saporiti Machado, J., Dias, A., Cruz, H., Pereira Custódio, J.E., Coutinho Palma, P.M. "Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira". VERLAG (2009). ISBN: 9789896420659.

### **4.2. ARTÍCULOS DE REVISTAS**

Anon. "The age of resin". *The Architects Journal*. February (1982). pp. 56-58.

Arriaga, F. "Estructura mixta de madera y hormigón (Sistema HBS)". *AITIM*. Nº 206. Madrid, Julio/Agosto (2000). pp. 83-84.

Avent, R., Emkin y Howard&Chapman. "Epoxy repaired bolted timber connections". *Journal of the Structural Division*. April (1976). pp. 821-838.

Bottinelli, G. "Habitat System Beton: ragioni, certificazione, risultati sperimentali". *Adrastea*. Nº 16. (2000).

Cecchi, A. "Rinforzo di solai in legno mediante soletta collaborante in calcestruzzo armato con collegamenti di tipo elastico". *Il restauro del legno*. Vol. 2. Nardini Editore. Florencia (1989). pp. 207-213.

Ceccotti, A. "Timber-concrete composite structures". *Timber Engineering*. STEP 2, E13. Editado por Centrum Hout. Holanda (1995).

Gramegna, F. y Marampon, F. "Dal rilievo del degrado per incendio alle scelte di consolidamento". *Adrastea*. 7/96. (1996). pp. 40-47.

Kreuzinger, H. "Mechanically jointed beams and columns". *Timber Engineering*. STEP 1, B11. Editado por Centrum Hout. Holanda (1995).

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada I. Metodología de puesta en obra". *Revista de Edificación*. Nº 28. Pamplona (1999). pp. 32-38.

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada II. Metodología de puesta en obra". *Revista de Edificación*. Nº 29. Pamplona, Mayo (1999). pp. 30-36.

Landa Esparza, M. "Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera. Elementos flexionados. Aporte de madera – Unión encolada". *AITIM*. Nº 204. Madrid, Marzo/Abril (2000). pp. 34-38.

Lambillon, J. " Le plancher «Bois-Béton V» de Claude Blouet. *L'Industriel sur Bois*. Janvier (1995). pp. 34-35.

Marradi, P., Messina, C. y Paolini, L. "Recupero di strutture in legno mediante armature parzialmente presollecitate". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 241-247.

Messina, C., Paolini, L. y Sestini, V. " Il recupero statico delle strutture in legno nel Teatro Niccolini di San Casciano de Pesa". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 201-208.

Mettem, C.J., Page, A.V. y Robinson, G.C. "Repair of structural timbers. Part 1: Test on experimental beam repairs". *TRADA*. Reino Unido (1993).

Mettem, C.J., Page, A.V. y Robinson, G.C. "Repair of structural timbers. Part 2: Fire resistant repairs". *TRADA*. Reino Unido (1993).

Sistema Beta. Manual técnico del sistema Beta de la empresa PROMAX, Protección de Maderas, S.A.

Stumes, P. "The W.E.R. system manual. Structural rehabilitation of deteriorated timber. Association for Preservation Technology". Ottawa, Canada (1979).

Tampone, G. "Restauro strutturale con lamine metalliche dei solai lignei della sede del Genio Civile di Firenze". *Il restauro del legno*. Vol. 1. Nardini Editore. Florencia (1989). pp. 263-281.

Tampone, G., Franci, F. y Campa, L. "Rinforzo di puntoni e consolidamento di una capriata del teatro di Sateano mediante centine metalliche". *Il restauro del legno*. Vol. 1 Nardini Editore. Firenze Italia (1989). pp. 299-305.

Tampone, G. "Problematiche operative nel cantiere di consolidamento di un solaio ligneo nella sede del genio civile di Firenze". *Legno e restauro*. Editrice Dialogo. Florencia (1989). pp. 207-208.

Tampone, G. "Tipologías estructurales y su respectiva degradación. Seminario «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1998). pp. 59-81.

#### **4.3. CONGRESOS**

Feio, A., S. Machado, J., M. Cunha, Vítor. "Reabilitação Estrutural: Análise de Técnicas de Reforço em Estruturas de Madeira". CIMAD-2011. 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção. Coimbra, Portugal. 7-9 junho 2011.

Monfort, J. y Pardo, J.L. "Reparaciones de forjados mediante hormigón". Seminario de «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Patología de elementos lineales de madera, inspección y diagnóstico. Universidad Politécnica de Valencia. E.U. de Arquitectura Técnica". Valencia, 22 Marzo de 1996.

Monfort, J. y Pardo, J.L. "Reparaciones de forjados mediante hormigón". Seminario de «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. E.U. de Arquitectura Técnica". (1998). pp. 136-168.



Navarrete, A. "Deterioro del material y su protección". Seminario «La conservación de la madera en los edificios antiguos». Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1998). pp. 23-56.

## **5. OTROS**

### **5.1. NORMATIVA**

ISO 3443-7:1988. Tolerancias por construir. Parte 7: Principios generales para criterios de aprobación, control de conformidad con datos específicos de tolerancia dimensionales y control estadístico. Método 2 (método de control Estadístico)

### **5.2. LIBROS**

#### **5.2.1. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE EVALUACIÓN**

##### **5.2.1.1. La técnica de ultrasonidos**

Echevarría R. "*Ultrasonido*". Universidad Nacional Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos No Destructivos (2002). 89 págs.

##### **5.2.1.2. La termografía de infrarrojos**

Busse, G., Wu, D. (1997). NDT of materials using lock-in thermography. Institute for Polymer Testing and Polymer Science (IKP). University of Stuttgart, Stuttgart (Germany)

Busse G (2001). Lockin thermography. In: Maldague X (ed) Nondestructive testing handbook. Vol 3. Infrared and thermal testing. American Society for Nondestructive Testing Inc, Columbus, OH, pp 318-327.

### **5.3. TESIS DOCTORALES**

Gayo Moncó, E. "La humedad como causa de patologías en monumentos: desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivo basadas en termografía infrarroja". Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Materiales. Facultad de Ciencias Físicas.

González Fernández, D.A. "Contribuciones a las técnicas no destructivas para la evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas". Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (2006).

Sham Fung Chu, J. Studies of using infrared flash thermography for detection of surface cracks, subsurface defects and water-paths in building concrete structures. University of Hong Kong (2008).

### **5.4. ARTÍCULOS**

Rodríguez Trobajo, E. "Procedencia y uso de madera de Pino Silvestre y Pino Laricio en edificios históricos de Castilla y Andalucía". *Arqueología de la Arquitectura*. Vol. 5. Madrid/Vitoria, Enero-Diciembre (2008). pp. 33-53.



## **ANEJOS A-D**

### **INSPECCIÓN DE EDIFICIOS. CASOS REALES**

**ANEJO-A:** INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DEL ORATORIO DE SAN FELIPE NERI (CÁDIZ)

**ANEJO-B:** INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE LA IGLESIA NTRA. SRA. DE LOS DOLORES (ISLA CRISTINA)

**ANEJO-C:** INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE UNA NAVE LATERAL DE LA IGLESIA NTRA. SRA. DE LA GRANADA (MOGUER)

**ANEJO-D:** INSPECCIÓN DE UN FORJADO DE ENTREVIGADO CUAJADO DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL (SEVILLA)



## **ANEJO-A**

### **INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DEL ORATORIO DE SAN FELIPE NERI (CÁDIZ)**

En este anejo se desarrollan las tareas de inspección y análisis de la cubierta del edificio del Oratorio de San Felipe Neri (Cádiz). Este estudio se acomete en varias fases:

1. Estudio de la planimetría del edificio. Localización del área de estudio.
2. Inspección in situ.
  - Fase 1: Inspección visual.
  - Fase 2: Realización de ensayos no destructivos (END):
    - Termografía
    - Xilohigrómetro
    - Ultrasonidos
3. Análisis de los resultados obtenidos. Diagnóstico

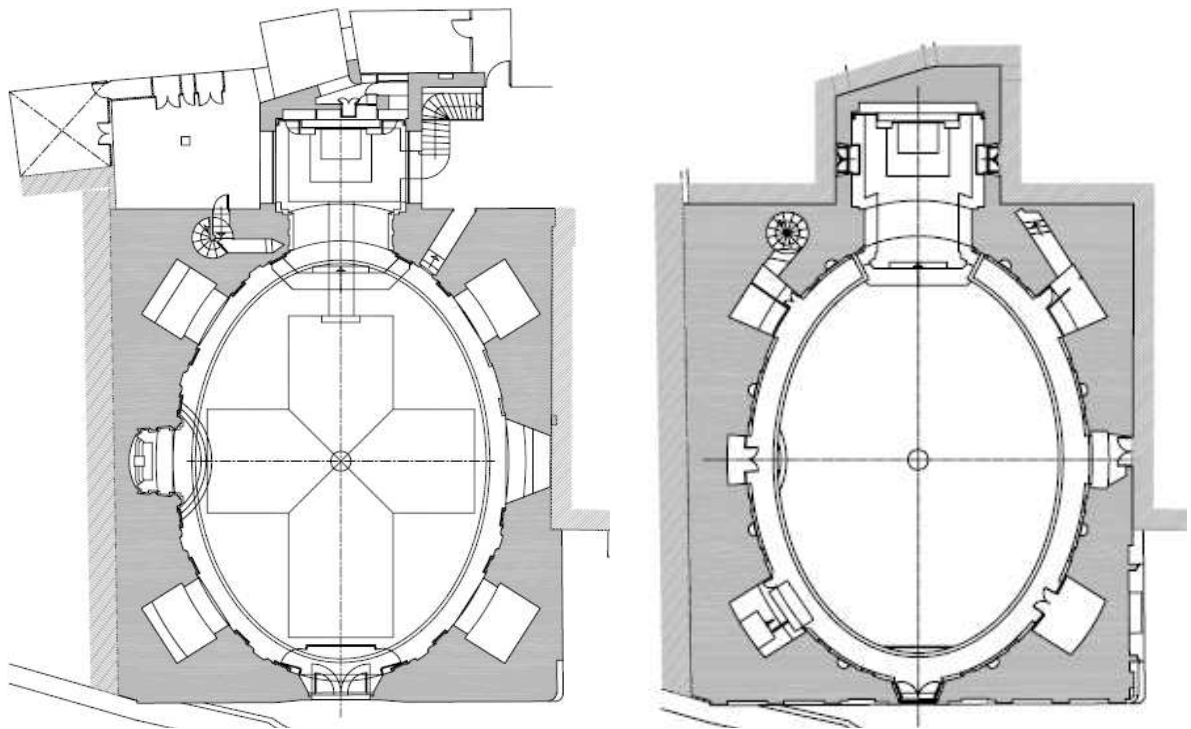
### A.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El actual oratorio de San Felipe Neri se inauguró el 17 de noviembre de 1719 y su construcción es el resultado de dos etapas. La primera se inició en 1688 según planos del alarife Blas Díaz y se terminó en 1717. Tras los estragos del terremoto de 1755, el templo se arruinó. En la segunda etapa, el maestro alarife Pedro Gutiérrez de San Martín (más conocido como maestro Afanador), construyó una nueva cúpula en 1764. Entre las reformas llevadas a cabo con posterioridad, hay que destacar la de 1775 que afecta a aspectos fundamentalmente decorativos (1, 2).

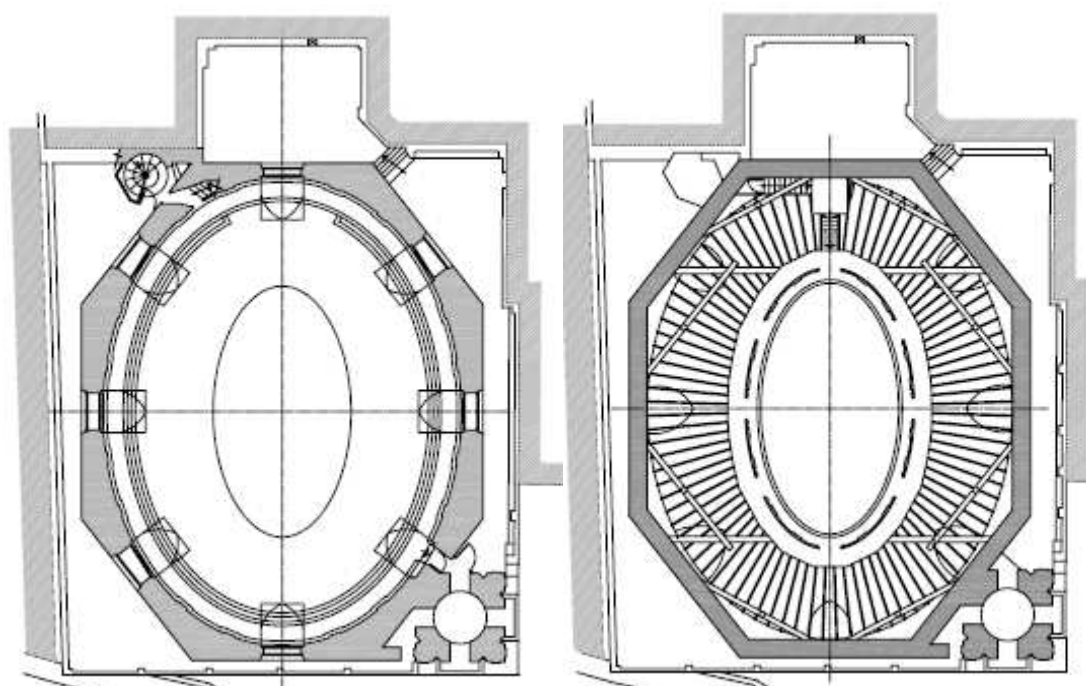
El modelo del templo, inspirado en la Iglesia de San Jácome del Corso de Roma y siguiendo los modelos de iglesias jesuíticas, es de planta elíptica (sus ejes miden 26,62 y 16,70 m) sobre la que se abren siete capillas de planta rectangular.

Los muros tienen pilastras pareadas que recorren los diferentes cuerpos, superponiéndose las de orden jónico y corintio, con hornacinas en los intercolumnios, y entre las que se abren vanos que restan gravedad a la estructura. Es frecuente en las iglesias conventuales que las tribunas se asomen a la nave; aquí se sustituyen por una superposición de triple balconada sobre cornisas. La cúpula es una gran estructura encamionada de doble casquete decorada con fajas, que prolongan el ritmo de las pilastras inferiores y entre las que se abren vanos que restan gravedad a la estructura.

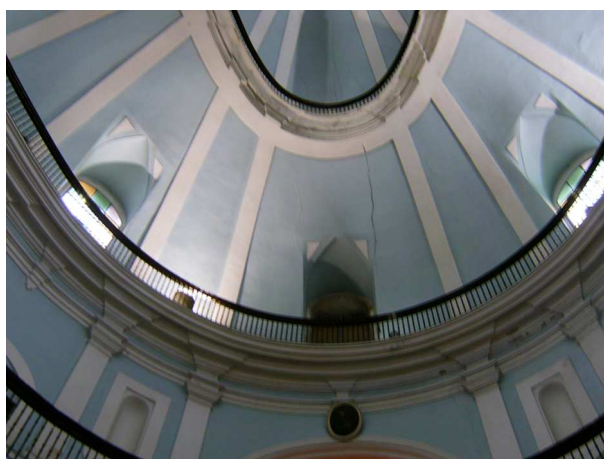
La cubierta del edificio se resuelve con una estructura de madera a 8 aguas y una cobertura de teja.



**Figura A.1.** Planimetría del Oratorio (a. Planta baja. b. Planta por la galería del nivel 1).



**Figura A.2.** Planimetría del Oratorio (a. Planta galería del nivel 2. b. Planta por la galería del nivel 3).



**Figura A.3.** Vista interior la cúpula. Triple balconada sobre cornisas.



**Figura A.4.** Estructura interior de la cúpula encamionada.

### A.1.1. LESIONES

Un análisis general del estado de conservación del edificio revela que el principal problema que aparece en el Oratorio es de origen estructural y está provocado por el empuje inducido por la componente horizontal de la estructura de cubierta. Este empuje ocasiona la pérdida de trabazón de los muros perimetrales con la consiguiente aparición de grietas en los vértices de unión de dichos muros.

En el interior del Oratorio, dado que la cubierta tiene una doble estructura, el empuje de la cubierta exterior desplazada hacia el tambor se materializa a través de grietas que aparecen en los ejes principales de las elipses de las cúpulas tanto en la cúpula inferior, sobre la que apoya, como en la superior.

Observamos, en la visita de inspección realizada, que este problema había aparecido en el edificio con anterioridad puesto que se pueden distinguir los refuerzos realizados en las esquinas del tambor mediante perfiles metálicos.



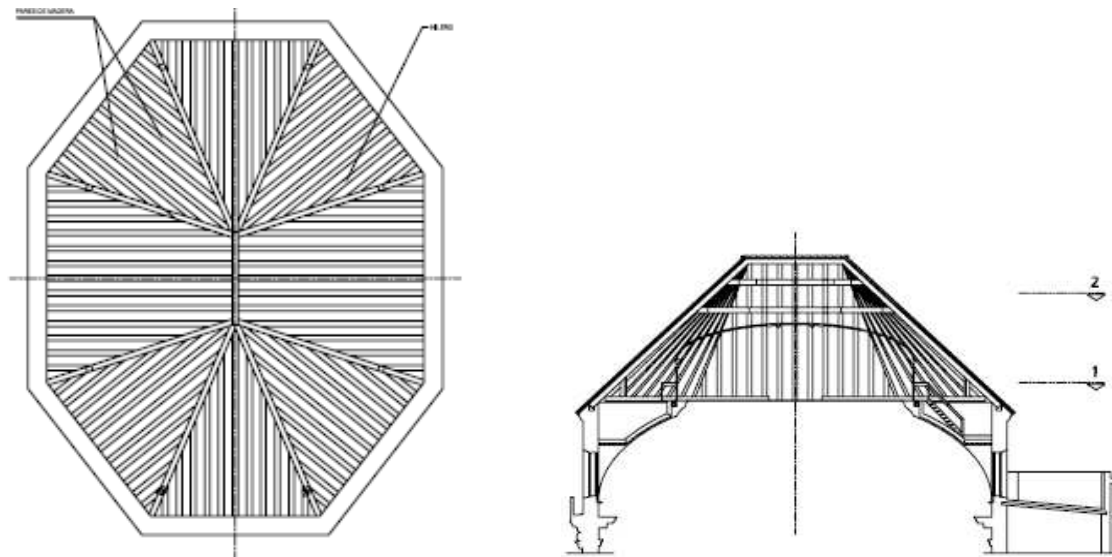
**Figura A.5.** Grietas verticales en la cúpula.



**Figura A.6.** Refuerzos metálicos de reparaciones anteriores.

## A.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DEL ORATORIO

La cubierta del Oratorio está resuelta con una estructura de madera a ocho aguas. La estructura de madera (pares y nudillos) está compuesta por vigas de madera aserrada de pino silvestre/laricio con una escuadría de los pares principales entre 20x25 cm y 14x23 cm y de 8 m de longitud. De esta estructura cuelga la estructura auxiliar de madera de sostén de la bóveda de yeso. El paño de la cubierta está formado por una tablazón de madera sobre la que existe una capa de mortero de hormigón con restos de impermeabilizantes asfálticos, resultado de anteriores intervenciones, y una cubierta de teja.



**Figura A.7.** Estructura de la cubierta. (a. Distribución de vigas y pares. b. Sección).

## A.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El estudio de la cubierta de madera del Oratorio pretende evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los elementos de madera. Para ello se sigue una metodología de análisis desarrollada en varias etapas:

- Fase 1: Inspección visual. A partir de la inspección visual es posible determinar la especie de madera y las posibles alteraciones causadas por ataques biológicos o contenidos de humedad elevados.
- Fase 2: Ensayos no destructivos: termografía, xilohigrómetro y ultrasonidos. A partir de los ensayos no destructivos es posible determinar las características mecánicas de la madera y la extensión de los daños.



### A.3.1. INSPECCIÓN VISUAL

En la inspección visual de la cubierta se determina que la madera de la estructura pertenece a una especie de coníferas, posiblemente pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) o laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

En cuanto a su estado de conservación se han detectado serios problemas de filtraciones. Estas filtraciones han ocasionado un deterioro generalizado de la tablazón y, en casos puntuales, ataques de pudrición parda en alguno de los pares.



**Figura A.8.** Deterioro generalizado de la tablazón.



**Figura A.9.** Par atacado por pudrición parda.

Finalmente, se ha detectado un ataque superficial de carcoma común. No se ha detectado ataque de termitas en los pares aunque sí se ha podido localizar su presencia en algún otro elemento de madera del edificio como las carpinterías.

### A.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS

Los ensayos no destructivos sobre la cubierta se han realizado en dos fases:

- Junio de 2009. Esta fase coincide con el desmonte de los elementos de cubrición.
- Septiembre de 2009. Tras realizarse las labores de tratamiento, sustitución y reparación de la estructura de madera.

A.3.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos

Los ensayos de termografía de infrarrojos se realizan en todo el interior de la cubierta de madera accediendo al camaranchón que separa ésta de la bóveda encamionada. En esta zona se han tomado imágenes del conjunto de los pares y la tablazón, de los pares con signos externos de pudrición, de la zona con defectos (nudos y fendas) y de las zonas reparadas (en la 2º fase).

Las condiciones ambientales durante las visitas realizadas se recogen en la Tabla A.1. La hora de los ensayos de ambos días fue las 12 horas del mediodía. Cabe destacar que la velocidad del viento el día 24 de septiembre dificultó en gran medida la toma de imágenes. Los parámetros controlados directamente desde la cámara son la temperatura reflejada (no temperatura ambiente) y la emisividad de la madera.

Tabla A.1. Condiciones ambientales de los días de realización de los ensayos.

DÍA	Tª MÍNIMA (°C)	Tª MÁXIMA (°C)	Tª HORA ENSAYO (°C)	VELOCIDAD VIENTO (Km/h)
9 junio	18	21	20	Sudoeste (18)
24 septiembre	20	27	23	Este (25)

Termograma 1. Termografía de conjunto del interior de la cubierta desde el camaranchón donde puede distinguirse la estructura de pares y la tablazón.

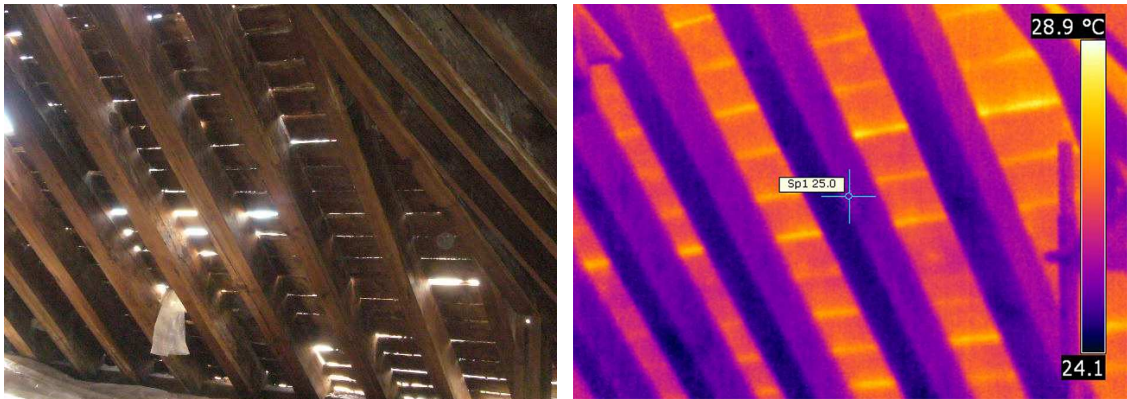


Figura A.10. Vista de conjunto del interior de la cubierta.

Termograma 2. Termografía del par con deterioro superficial por pudrición parda.



Figura A.11. Deterioro superficial de un par.

Termograma 3. Termografía de un par con fenda.



**Figura A.12.** Fendas en un par.

Termograma 4. Termografía de un par con nudos.



**Figura A.13.** Nudos en un par.

Termograma 5. Termografía de par reparado con empalme de madera nueva.

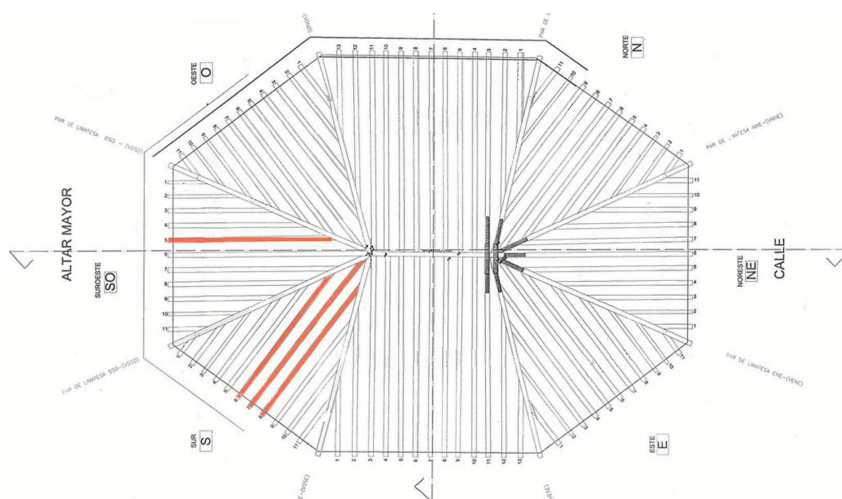


**Figura A.14.** Empalme con madera nueva.

### **A.3.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y del tiempo de transmisión de ultrasonidos**

Tras realizar los ensayos de termografía se realizan ensayos de determinaciones de contenido de humedad y medidas de tiempos de transmisión de ondas ultrasónicas, mediante la metodología desarrollada por Rodríguez Liñán C y Rubio De Hita, P. (3).

La selección de los pares a ensayar se realiza tras la inspección visual y termográfica de la cubierta tomando las piezas que resultan más representativas según su nivel de deterioro o contenido de humedad (localizadas mediante la termografía). La elección de estas piezas permite extrapolar los resultados obtenidos al resto de la estructura.



**Figura A.15.** Localización de los pares donde se realizan ensayos de ultrasonidos.

En cada par se selecciona la sección más representativa y en esta sección se realizan 3 mediciones (en el centro y a 3 cm de los bordes superior e inferior). Finalmente se obtiene una velocidad de transmisión ultrasónica media para cada par.

Los resultados de las mediciones se recogen a continuación en la Tabla A.2. En esta tabla se representan los valores medios de las secciones más representativas de cada par. Los resultados se refieren a una humedad del 12% por lo que las mediciones obtenidas in situ de los diferentes elementos (con humedades diferentes) pueden ser comparadas aunque los contenidos de humedad difieran.

<b>PAR 7 (PUDRICIÓN PARDA)</b>				
<b>Sección</b>	<b>Altura</b>	<b>Separación (cm)</b>	<b>Tiempo (μs)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>1</b>	T <sub>1</sub>	19,50	235,00	8,90
	T <sub>2</sub>	19,50	295,00	8,90
	T <sub>3</sub>	19,50	460,00	8,90

<b>PAR 8 (SANO)</b>				
<b>Sección</b>	<b>Altura</b>	<b>Separación (cm)</b>	<b>Tiempo (μs)</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>1</b>	T <sub>1</sub>	20,00	142,00	9,30
	T <sub>2</sub>	20,00	153,00	9,30
	T <sub>3</sub>	20,00	136,00	9,30



PAR 7 (REPARADO)				
Sección	Altura	Separación (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
1	T <sub>1</sub>	19,50	190,00	8,40
	T <sub>2</sub>	19,50	--	8,40
	T <sub>3</sub>	19,50	157,00	8,40

PAR 6 (SANO)				
Sección	Altura	Separación (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
1	T <sub>1</sub>	20,00	134,00	9,60
	T <sub>2</sub>	20,00	--	9,60
	T <sub>3</sub>	20,00	136,00	9,60

PAR 5 (SANO, LIGERO ATAQUE DE CARCOMA COMÚN SUPERFICIAL)				
Sección	Altura	Separación (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
1	T <sub>1</sub>	19,50	275,00	9,00
	T <sub>2</sub>	19,50	--	9,00
	T <sub>3</sub>	19,50	146,00	9,00

## A.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO

### A.4.1. INSPECCIÓN VISUAL

De la inspección visual se deduce que la madera de la estructura pertenece a una especie de coníferas, posiblemente pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L) o laricio (*Pinus Nigra* Arnold). Asimismo, se trata de una madera con una gran cantidad de nudos.

En cuanto al estado de conservación, se detecta un mal estado generalizado de la capa de cobertura que origina filtraciones generalizadas sobre la estructura de madera. Estas filtraciones han ocasionado un deterioro generalizado de la tablazón y, en casos puntuales, ataques de pudrición parda en alguno de los pares.

Finalmente, se detecta un ataque superficial de carcoma común. No se ha detectado ataque de termitas en los pares aunque sí se ha podido localizar su presencia en algún otro elemento de madera del edificio como las carpinterías.

### A.4.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS

El uso conjunto de las técnicas de la termografía y de los ultrasonidos ha permitido optimizar el rendimiento en la inspección y facilitar la labor de diagnóstico.

#### A.4.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos

Como método de análisis de la inspección in situ se ha realizado una comparativa entre la fotografía digital de un elemento o conjunto y su termografía (en el caso de no tener exactamente la misma toma se ha utilizado una similar). Las Figuras A.10, A.11 y A.14 reúnen ambas vistas. Como resultado de este análisis ha sido posible determinar:

1. Diferencia de humedad entre zonas (Figura A.11)

La humedad es un parámetro que altera las propiedades térmicas de la madera. Esta diferencia de humedad se traduce en una diferencia térmica entre la zona humedecida y la zona seca. El agua presente en la madera causa un incremento del calor específico, la conductividad y la densidad del material (4) lo que conlleva a que sea necesaria una mayor cantidad de energía para calentar la pieza.

## 2. La estructura de los pares y tablazón (Figura A.10)

La temperatura superficial de un elemento de madera viene dada por la temperatura del aire y por sus propiedades térmicas (calor específico, conductividad y difusividad, que dependen, a su vez, de la especie de madera, de la densidad o la humedad) (5). En este caso las condiciones exteriores del ensayo ( $T^a$  del aire y humedad relativa) intervienen de igual manera sobre todos los elementos. Con todo ello se deduce que la diferencia térmica es el resultado de las propiedades térmicas de cada elemento. El empleo de dos especies de maderas distintas, cada una de ellas con una densidad característica, y la diferencia de espesor entre las piezas se traducen en una diferencia térmica entre los elementos. El calor procedente del calentamiento solar de la cubierta es conducido a través de las piezas hasta alcanzar su cara opuesta que coincide con el interior de la estructura desde donde se toma la imagen termográfica. Así, como se revela en el termograma, la tablazón (piezas con menor espesor) alcanza una temperatura más elevada que los pares en el mismo intervalo de tiempo.

## 3. Zonas con pérdida de densidad y elevada pudrición unido a un contenido de humedad superior (Figura A.11).

Las propiedades térmicas de la madera sana y la madera deteriorada son distintas, como resultado de una diferencia de humedad entre ambas (6, 7). En la madera deteriorada la presencia de humedad es mayor debido a que su estructura interna es menos densa. En este termograma confirmamos una diferencia de temperatura entre la madera sana y la madera deteriorada resultado de esta diferencia de humedad. No obstante, podemos añadir que si la zona donde se localiza el deterioro ya está seca no se aprecian diferencias térmicas notables, aunque el deterioro sea superficial.

## 4. Pares con fendas (Figura A.12).

La presencia de defectos en la madera interviene en la conductividad del calor, provocando zonas de concentración o disipación de calor. En este caso, la apertura de la fenda provoca que el calor se disipe a través de la misma apareciendo reflejado en el termograma como una zona de menor temperatura. Este tipo de discontinuidades también pueden interpretarse como una diferencia de emisividad, ya que este parámetro depende, entre otros factores, del ángulo de incidencia, que en el caso de la fenda varía.

## 5. Pares con nudos (Figura A.13).

Como las fendas, los nudos son defectos que provocan interferencias en el proceso de transmisión de calor. La temperatura superficial de la madera es función, entre otros parámetros, de la densidad. Así, puesto que los nudos son defectos con una densidad superior con respecto al resto de la madera sana sus propiedades térmicas (difusividad y conductividad térmicas) son distintas y por tanto, alcanzan una temperatura superficial diferente (mayor o menor, según el proceso de estimulación térmica), como queda reflejado en el termograma.

Tanto en el análisis de las fendas como los nudos, cobra especial relevancia el tamaño del defecto y su relación con la distancia del ensayo y las características de la cámara empleada. En ambos casos el termograma ha sido tomado a 1 m aproximadamente del defecto, pero estos mismos defectos pueden resultar imperceptibles a mayores distancias.

## 6. Zonas reparadas con madera nueva (Figura A.14).

En este caso una diferencia de densidad entre las distintas maderas conlleva a que sus propiedades térmicas sean diferentes y que puedan distinguirse en el termograma. Los ensayos realizados en laboratorio confirman que es posible distinguir especies de madera que tienen una densidad distinta (8).

**A.4.2.2. Ensayos de ultrasonidos**

El análisis de los resultados de ultrasonidos se acomete desde dos perspectivas distintas (Capítulo V.2):

- Madera sana. Para la madera sana se determina el rango de velocidades longitudinales para, de este modo, estimar la resistencia a flexión de los pares en buen estado.
- Madera deteriorada. En el caso de la madera deteriorada se estudia el rango de velocidades normales. A partir de las velocidades normales es posible determinar la pérdida de densidad de los pares deteriorados.

Todos los resultados se recogen en la Tabla A.2.

**Tabla A.2.** Resultados de ensayos de ultrasonidos.

ZONA	PAR Nº	DIMENSIONES (cm)	VELOCIDAD NORMAL MEDIA <sub>12</sub> (m/s)	VELOCIDAD LONGITUDINAL <sub>12</sub> (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN <sup>1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	PÉRDIDA DE DENSIDAD <sup>2</sup> (%)
Sur	7 (pudrición parda)	19,5x28	590,90	--	--	29,85
Sur	8 (sano)	20x25,5	1392,10	3689,06	25,07	--
Sur	7 (reparado)	19,5x28	1251,80	3317,27	17,19	--
Sur	6 (sano)	20x25	1647,30	4365,34	39,41	--
Suroeste	5 (ligero ataque de carcoma común)	19,5x25	1149,80	--	--	7,72

El análisis de estos resultados muestra que el rango de velocidades de la madera sana de la estructura oscila entre 3689,06 y 4365,34 m/s. Estos valores de velocidad permiten asignar unos valores de resistencia a flexión que varían entre 25,07 y 39,41 N/mm<sup>2</sup>. El valor del 5º percentil es 25,787 N/mm<sup>2</sup>. Para obtener el valor de la clase resistente el valor del 5º percentil de la muestra debe minorarse<sup>3</sup> teniendo en cuenta el escaso número de pares ensayados obteniendo, en este caso, una clase resistente C16 (9). Si incluimos en estos resultados las mediciones sobre los pares reparados, el valor de la velocidad longitudinal baja hasta 3317,27 m/s y el valor del 5º percentil del conjunto es 17,97 N/mm<sup>2</sup>. En este caso, la clase resistente toma un valor de C12. Este valor no debe tomarse en consideración puesto que la reparación del par mediante aporte de madera provoca una discontinuidad en el material que es detectada por los ultrasonidos y provoca una bajada de velocidad.

Referido a la madera deteriorada, los ensayos de ultrasonidos revelan una pérdida de densidad de 30% en aquellos pares con un estado avanzado de pudrición. Estos pares han sido reparados sustituyendo las zonas dañadas por una madera de similares características a la existente mediante uniones encoladas.

**A.5. CONCLUSIONES**

De todo el proceso de análisis realizado podemos concluir que:

1. La termografía de infrarrojos se revela como una técnica de inspección in situ de estructuras de madera, como grandes cubiertas, en espacios con una difícil accesibilidad.

<sup>1</sup> La ecuación empleada para la estimación de la resistencia a flexión es  $MOR (N/mm^2) = 0,0212V_L - 53,131$

<sup>2</sup> La ecuación empleada para la pérdida de densidad es  $\Delta d (\%) = 53,257 - 0,0396 V_N$

<sup>3</sup> La resistencia a flexión debe minorarse teniendo en cuenta el tamaño de la muestra según la Tabla 1 de la norma UNE EN 384:2010. En este caso asignamos un factor de corrección de **0,6**.

2. A partir de una inspección mediante termografía se puede conocer y aportar información sobre distintos aspectos: zonas con distinto contenido de humedad y que, por tanto, puedan presentar, en el momento de la inspección o en un futuro, signos de pudrición. También es posible distinguir maderas de distinta densidad (tablazón y pares y zonas con madera de reparación), zonas reparadas que presentan una discontinuidad del material, zonas con deterioro superficial (si éstas presentan un contenido de humedad superior a la madera sana) y pérdida generalizada por pudrición así como la presencia de nudos y fendas.
3. El viento atenúa las temperaturas superficiales de los cuerpos y las diferencias térmicas que pueda existir entre distintas zonas por el efecto de la convección enmascarando los resultados reales. Es por ello que las inspecciones termográficas deben realizarse en días sin viento.
4. Para obtener datos más precisos sobre la pérdida de densidad por pudrición o ataque de xilófagos en el interior de la madera es necesario el uso de una técnica complementaria como pueden ser los ultrasonidos. Los ultrasonidos se presentan como una técnica eficaz para establecer un diagnóstico sobre el estado de deterioro de una estructura de madera permitiendo estimar su grado de deterioro.

Con todo ello puede concluirse que la unión de las técnicas de ultrasonidos y termografía para la inspección in situ de estructuras de madera constituye una buena herramienta para evaluar el estado de conservación de una estructura.

## Referencias

- (1) Pemán Medina, M. "Contribución al estudio de la arquitectura gaditana. El maestro Afanador". Archivo Español de Arte, Nº 198, (Madrid, 1977), pp. 97-119.
- (2) Pemán Medina, M. "La Iglesia de San Felipe Neri, la arquitectura del templo y su significación a la luz de nuevos datos". Boletín del Museo de Cádiz, Nº 2, (Cádiz, 1980), pp. 29-100.
- (3) Rodríguez Liñán C. Rubio de Hita P. "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla Secretariado de Publicaciones, 2000.
- (4) Ludwig, N, Redaelli, V, Rosina, E, Augelli, F. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. Infrared Physics & Technology Vol. 46. (2004), pp. 161-166.
- (5) Tanaka, T. "Wood inspection by thermography". 12th International Symposium on non-destructive testing of wood. Wood NTD-2000 Vol. I6, nº 03 (2001).
- (6) Wyckhuysse, X. Maldague. "A study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography". Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 13, nº 1 (2001), pp. 1-12. DOI: 10.1007/s00164-001-0005-y.
- (7) Wyckhuysse, X. Maldague. Wood Inspection by Infrared Thermography, Part II. Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 13, nº 1 (2001), pp. 13-21. DOI: 10.1007/s00164-001-0006-x.
- (8) Morales Conde, MJ; Rodríguez Liñán, C; Rubio de Hita, P; Pérez Gálvez, F. 2012. Infrared Thermography Applied to Wood. *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 13 [1]: p. 32-45.
- (9) UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.



## **ANEJO-B**

### **INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE LA IGLESIA NTRA. SRA. DE LOS DOLORES (ISLA CRISTINA)**

En este anejo se desarrollan las tareas de inspección y análisis de la cubierta de la Iglesia de Ntra. Sra. de los Dolores (Isla Cristina, Huelva). Este estudio se acomete en varias fases:

1. Estudio de la planimetría del edificio. Localización del área de estudio.
2. Inspección in situ.
  - Fase 1: Inspección visual.
  - Fase 2: Realización de ensayos no destructivos (END):
    - Termografía
    - Xilohigrómetro
    - Ultrasonidos
  - Fase 3: Toma de muestras.
3. Ensayos de laboratorio.
4. Análisis de los resultados obtenidos. Diagnóstico.

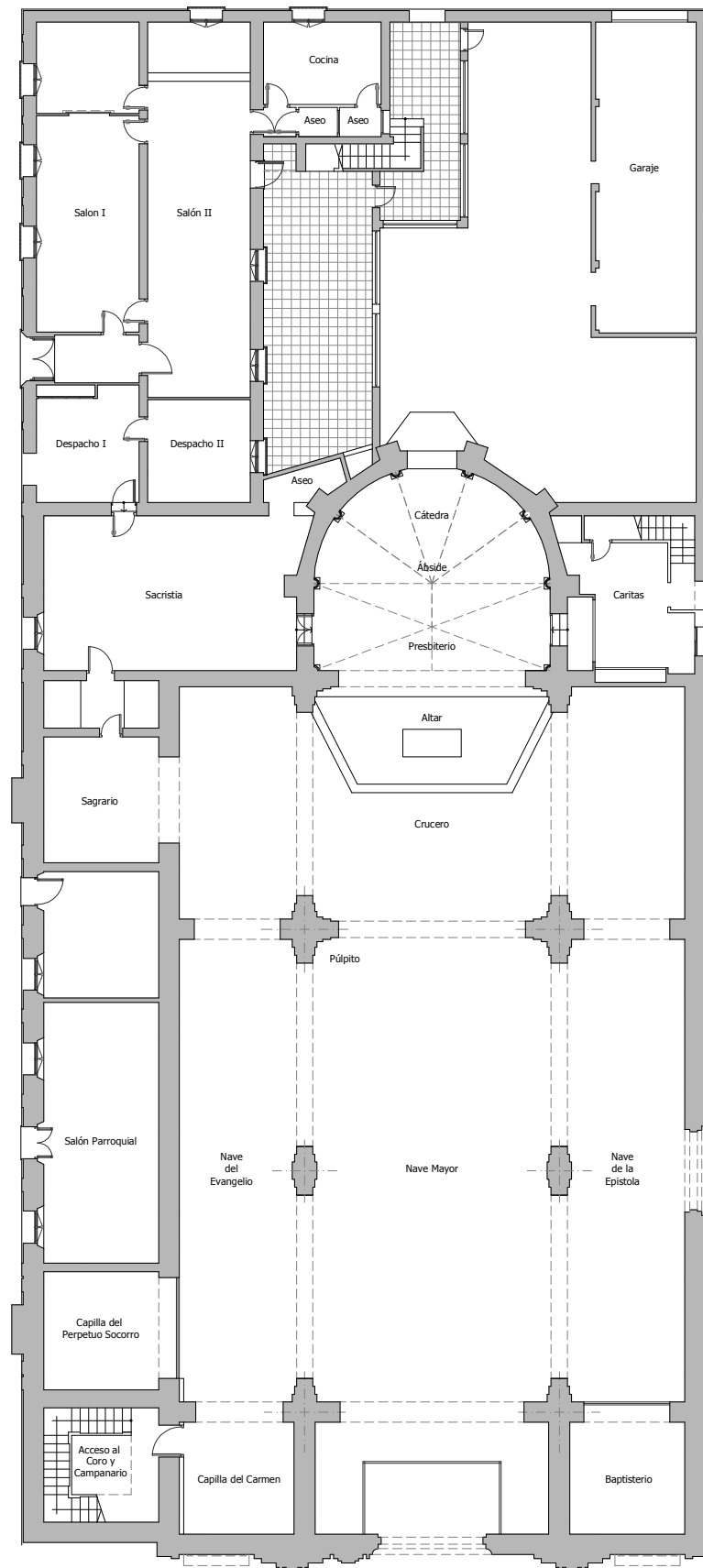
### B.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

La Iglesia de Ntra. Sra. de los Dolores está ubicada en el centro de Isla Cristina (Huelva). Data de 1929 aunque fue reconstruida en 1942 según planos de Alberto Balbontín de Orta y Antonio Delgado Roig tras su destrucción durante la Guerra Civil Española (1936-1939). En 1954 fue abierta al culto por el obispo de Huelva Cantero Cuadrado aunque su torre no se concluyó hasta 1968.

El edificio es de planta rectangular con una torre campanario adosada al lado izquierdo. Interiormente se distribuye a través de un espacio principal, el espacio de culto, al que se anexionan una serie de pequeños espacios formando los salones parroquiales y la sacristía. Este espacio de culto principal está organizado en tres naves siguiendo la orientación litúrgica tradicional oeste-este y cuya nave principal, de mayor altura y anchura que las laterales, se remata con un ábside en su cabecera. La estructura portante del edificio está formada por muros de carga y pilastras unidas con arcos ojivales y de medio punto. Exteriormente se resuelve con una portada neobarroca y fachadas sencillas de líneas rectas, realizadas en ladrillo y revestidas de enfoscado de mortero y pintura de color blanco.



**Figura B.1.:** Exterior de la Iglesia de Ntra. Sra. de Los Dolores (Figura extraída de <http://huelva.turismoenpueblos.es/isla-cristina-nace-con-felipe-v-y-la-iglesia-de-ntra-sra-de-los-doce-apostoles/252/>)



**Figura B.2.** Planta de la Iglesia. El espacio principal se organiza en 3 naves (Nave Mayor y las Naves del Evangelio y la Epístola).

### B.1.1. LESIONES. ESTADO DE CONSERVACIÓN DEL EDIFICIO

Un análisis general del estado de conservación del edificio revela que el principal problema que aparece en la Iglesia está relacionado con su enclave geográfico. La humedad procedente de las filtraciones a través de los muros y la cubierta unida al ambiente salino, propio de la costa, originan que los elementos de hormigón armado, fundamentalmente los forjados, presenten serios problemas de corrosión.

Exceptuando el forjado de la nave central, el resto de forjados del edificio son forjados unidireccionales de nervios de hormigón armado de 10 cm apoyados sobre muros de carga. El intereje es de 50-60 cm con un entrevigado de revoltón de material cerámico. Todos los forjados están afectados por las mismas lesiones: humedades y corrosión de las armaduras de los nervios. En los casos de corrosión más avanzada se ha producido una pérdida de sección en las barras.

En cuanto a los elementos estructurales verticales, muros y pilastra, se detecta que sus espesores varían dependiendo de su situación. En general, los muros de fachada tienen un espesor de 0,70 m y los muros interiores 0,50 m. En cuanto a las pilastras que sustentan las arcadas de la Nave Mayor su sección es también variable. Todos estos elementos están afectados por humedades de capilaridad que suben por encima del revestimiento de los azulejos con afloraciones de sales procedentes de los materiales constituyentes de las mismas. Estas humedades han provocado el deterioro y el desprendimiento de los revestimientos (enfoscados de mortero y pinturas).

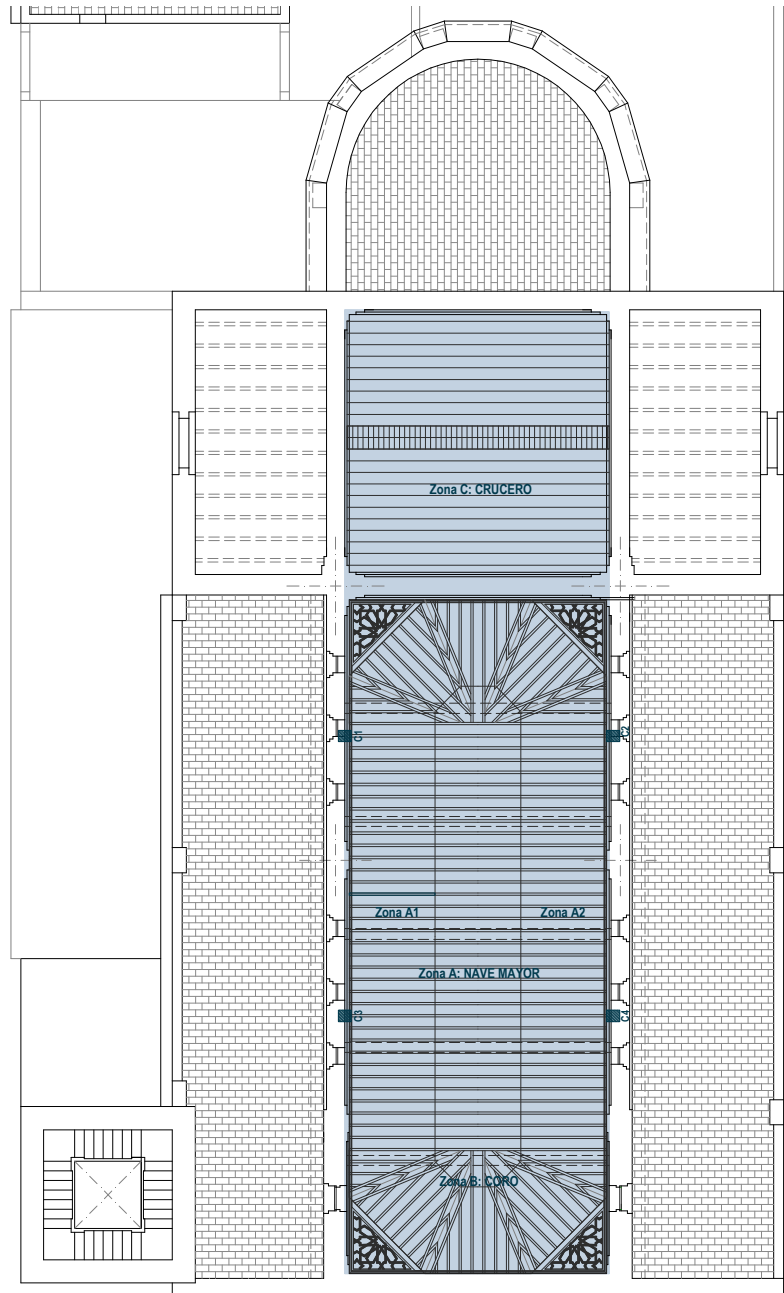


**Figura B.3.** Deterioro de los revestimientos de las pilastras con afloración de sales.

### B.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DE LA IGLESIA

La cubierta de la Nave Mayor de la Iglesia, objeto de este estudio, está resuelta con una estructura de madera de par y nudillo con tirantes dobles. El intereje entre pares es de 37,7 cm y sobre estos, como elemento de entrevigado, existen unos plafones decorados de madera de 1,5 cm de espesor. Finalmente, sobre la tablazón se dispone un cañizo con mortero de cal y sobre éste la cubierta de teja cerámica a dos aguas.

Las naves laterales se resuelven con una cubierta transitable de baldosa cerámica a un agua que desagua mediante mechinales.



**Figura B.4.** Planta de cubiertas de la Iglesia. Localización de la zona de estudio (cubierta de la Nave Mayor y Crucero).

### B.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Mediante el estudio de la cubierta de madera de la Nave Mayor se pretende evaluar su estado de conservación, así como, las propiedades físicas y mecánicas de los elementos que la componen, pares y tirantes. Para ello se sigue una metodología de análisis desarrollada en varias etapas:

- Fase 1: Inspección visual.
- Fase 2: Ensayos no destructivos: termografía, xilohigrómetro y ultrasonidos.
- Fase 3: Toma de muestras y ensayos en laboratorio.

**B.3.1. INSPECCIÓN VISUAL**

A partir de la inspección visual se determinan los principales aspectos de la estructura:

- Geometría, dimensiones y uniones de los elementos (pares y tirantes). Además, a partir de la inspección visual es posible localizar reparaciones anteriores así como el acabado superficial de los elementos.

- Especie de madera (distinguiendo entre coníferas y frondosas) y su calidad mediante la medición de los nudos, la desviación de la fibra y las fendas.

- Estado de conservación, detectando posibles alteraciones biológicas o contenidos de humedad elevados.

En el caso que nos ocupa, el análisis visual revela que se trata de una madera de coníferas con una gran cantidad de defectos tales como nudos, muchos de ellos de un diámetro considerable, y fendas, de gran profundidad, longitud y apertura.

En cuanto al estado de conservación de la estructura, a continuación se realiza un análisis pormenorizado por zonas:

- **Nave Mayor.** Dentro de la Nave Mayor, la zona marcada como A1 (lateral izquierdo) presenta aparentemente buen estado. No obstante, aparecen signos de deterioro en dos plafones de la tablazón. Para conocer el avance real del deterioro y la capacidad resistente de estos pares se plantea realizar ensayos de ultrasonidos incluyendo los tres pares adyacentes de los plafones deteriorados.

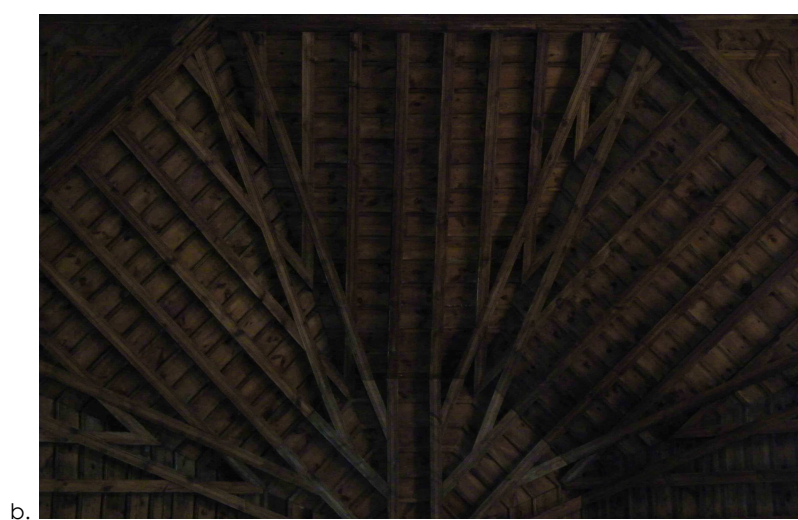
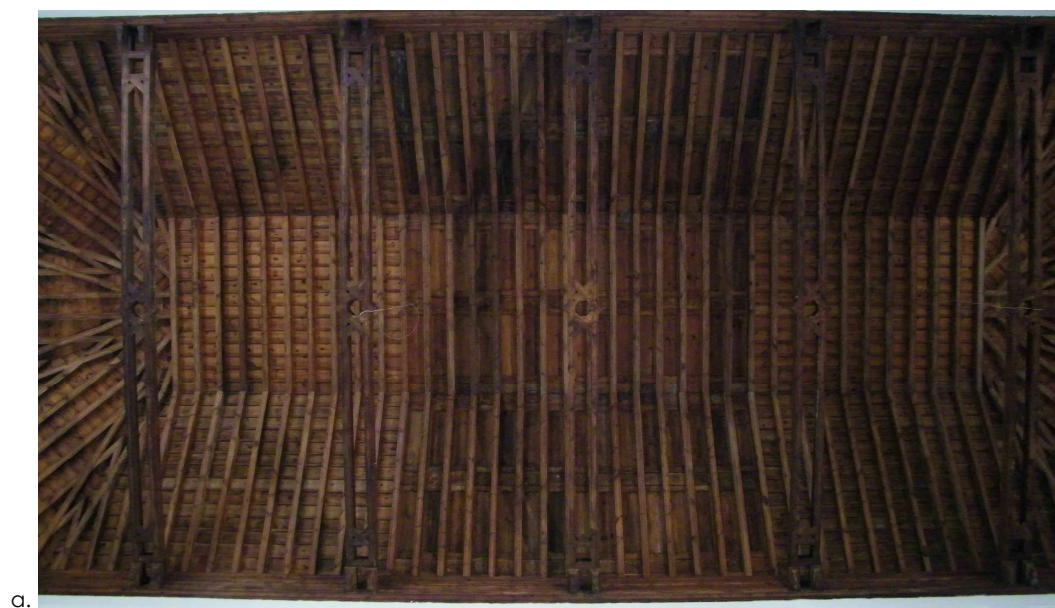
La zona A2 (lateral derecho) muestra mejor estado de conservación que la zona anterior. Tan solo en dos zonas puntuales junto al empotramiento aparecen signos de deterioro y se planifica abrir dos catas, C2 y C4.

La madera de los tirantes, como el resto, cuenta con un número importante de nudos, apareciendo fendas de gran profundidad y apertura. Se detecta un ataque de carcoma pequeña consiguiendo una penetración de 1 cm bajo la acción de un punzón. Por otro lado, la flecha originada por la acción del peso propio ha provocado el desplazamiento de la unión en rayo de Júpiter.

- **Coro.** En el coro (zona B) se localiza la parte más dañada de la cubierta. Un desplome hacia el exterior del muro de fachada ha producido la fisuración de la cubierta provocando filtraciones en el encuentro de la cubierta con el muro. La parte más deteriorada es el arrocabe y los plafones inferiores (por ser piezas de menor espesor son más susceptibles de deterioro). Asimismo también posee pudrición la parte empotrada de los pares.
- **Crucero.** El aspecto que muestra la madera de la cubierta del crucero (zona C) es distinto que el de la Nave Mayor. Mientras que la madera de la nave aparece con un tratamiento superficial (probablemente barniz) esta madera aparece sin tratar por lo que su aspecto difiere del anterior.

El cambio de color de la tablazón denota una gran presencia de humedad como resultado de las filtraciones que se están produciendo desde la cubierta. Asimismo se detecta la aparición de ataque por carcoma grande en uno de los pares.





**Figura B.5.** Vista general de cada área de estudio (a. Nave Mayor. b. Coro. c. Crucero.)





**Figura B.6.** Vistas de la inspección de la Nave Mayor (a. Plafones deteriorados en el área A1 (lateral izquierdo de la Nave Mayor). b. Cata abierta en el área A2 (lateral derecho de la Nave Mayor). c. Fenda longitudinal en el tirante T6. d. Desplazamiento de la unión en Rayo de Júpiter causada por la flecha).



**Figura B.7.** Vistas de la inspección del Coro (a. Vista general del deterioro del Coro. b. Pudrición del friso).



**Figura B.8.** Cambio de color de la tablazón del Crucero.

En cuanto al deterioro producido por agentes xilófagos se encontraron evidencias de ataques producidos por los siguientes organismos:

- *Carcoma pequeña*. Su ataque es generalizado aunque no muy intenso con galerías de un diámetro medio de 2 mm. En zonas con un grado de humedad elevado, tales como el encuentro de la cubierta con el muro de fachada sobre la zona del Coro, se detecta un ataque de mayor intensidad.
- *Carcoma grande*. Su ataque se ha localizado en una zona puntual del Crucero. Las galerías producidas por estas larvas son de un tamaño mucho mayor que la carcoma pequeña alcanzando un diámetro de 10 mm.
- *Pudrición parda*. Aparecen con síntomas de pudrición las cabezas empotradas de las vigas de la Zona B (Coro) y los plafones de la Zona A1 (Nave Mayor). Este tipo de lesión siempre va asociada a un contenido de humedad de la madera muy elevado producido, en este caso, por filtraciones de la cubierta. Hay que tener en cuenta que la pudrición facilita la digestión de la madera del duramen a la carcoma pudiendo producirse un ataque combinado que dañaría de manera severa a la misma.
- *Termitas*. Aparentemente no hay signos de termitas en la cubierta. No obstante, en algunos de los retablos si se ha detectado ataque por termitas, que, en uno de los casos, asciende hasta la cubierta y aparece como un ataque puntual en una de las catas (cata C4). El estudio de los pares adyacentes a la cata denotan que este ataque es localizado y no se ha extendido por el resto de la cubierta.



**Figura B.9.** Ataque de termitas en una muestra extraída de la cata C4.

#### **B.3.1.1. Clasificación visual según la norma UNE 56544:2007 (1)**

La clasificación visual de las piezas se realiza examinando la posición y las dimensiones de sus defectos. Para ello las piezas se agrupan en función de su escuadría dividiendo en piezas con un ancho de sección inferior o superior a 70 mm. Para cada caso la norma establece unos criterios de medición de defectos específicos y unas calidades visuales. Para las piezas con un ancho inferior a 70 mm la norma clasifica en piezas de calidad estructural ME-1 o ME-2, mientras que para las piezas de escuadrías superiores a 70 mm se establece una calidad estructural única, MEG. Los criterios de medición de defectos en cada caso se recogen a continuación.

**Tabla B.1.** Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura < 70 mm.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 1/5 \text{ "h"}$	$d \leq 1/2 \text{ "h"}$
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 1/2 \text{ "b"}$ y $d \leq 30 \text{ mm}$	$d \leq 2/3 \text{ "b"}$
Fendas	De secado	$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
		Las fendas de secado solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dos dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.	
	Rayo Heladura Abatimiento	No permitidas	
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Gemas - Longitud - Dimensión relativa		$\leq 1/4 \text{ de "L"}$ $g \leq 1/4$	$\leq 1/3 \text{ de "L"}$ $g \leq 1/3$

**Tabla B.2.** Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura > 70 mm.

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
Diámetro de los nudos sobre la cara (h)		$d \leq 2/3 \text{ "h"}$
Diámetro de los nudos sobre el canto (b)		$d \leq 2/3 \text{ "b"}$
Fendas	De secado	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.
	Rayo Heladura Abatimiento	No permitidas
Desviación de la fibra		1:6 (16,7%)
Gemas - Longitud - Dimensión relativa		$\leq 1/3 \text{ de "L"}$ $g \leq 1/3$

- **Crucero.** De acuerdo a las especificaciones de la Tabla B.1, los pares que componen la estructura del crucero (65 x 145 mm) fueron clasificados de forma general como ME-2, aunque algunos fueron excluidos de la clasificación debido al tamaño del nudo. Para esta calidad visual y la especie de madera de la estructura (determinada mediante ensayos de laboratorio) la norma atribuye una clase resistente C18.
- **Nave Mayor y Coro.** Muchos de los elementos que componen la Nave Mayor y el Coro (95 x 130 mm) fueron excluidos de la clase estructural MEG debido al gran tamaño de los nudos y las fendas. Para estas piezas la norma no atribuye ninguna clase resistente ya que se consideran piezas no aptas para estructuras.



### B.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS

Tras realizar un primer análisis visual de la cubierta en la primera visita al edificio en junio de 2009, se planifica una campaña de ensayos no destructivos. Se realizan ensayos de termografía, determinación del contenido de humedad y medición de la velocidad ultrasónica. A partir de estos ensayos se pretende determinar las características mecánicas de la madera y la extensión de los daños.

#### B.3.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos

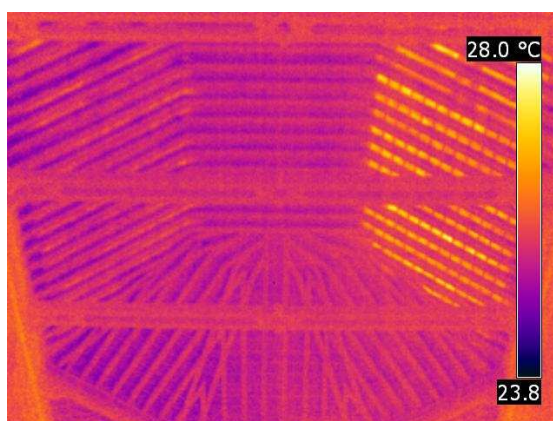
Los ensayos de termografía de infrarrojos se realizan en el interior de la Iglesia para localizar posibles humedades por filtración de la cubierta (2). Los ensayos se realizan en 2 jornadas.

Las condiciones ambientales durante las visitas realizadas se recogen en la Tabla B.3. La hora de los ensayos de ambos días fue aproximadamente a las 12 horas del mediodía.

**Tabla B.3.** Condiciones ambientales de los días de realización de los ensayos.

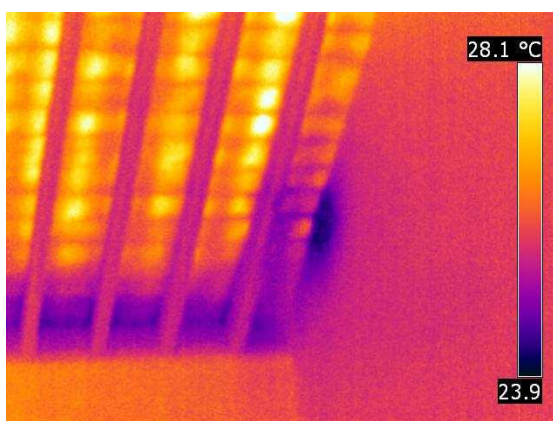
DÍA	Tª MÍNIMA (°C)	Tª MÁXIMA (°C)	Tª HORA ENSAYO (°C)	VELOCIDAD VIENTO (Km/h)
6 julio	16	27	26	Noroeste (25)
7 julio	16	27	27	Noroeste (22)

Termograma 1. Termografía de la Nave Mayor.



**Figura B.10.** Termografía general de la Nave Mayor.

Termograma 2. Termografía de un área localizada del Crucero.



**Figura B.11.** Termografía del Crucero (I).

Termograma 3. Termografía de un área localizada del Crucero.

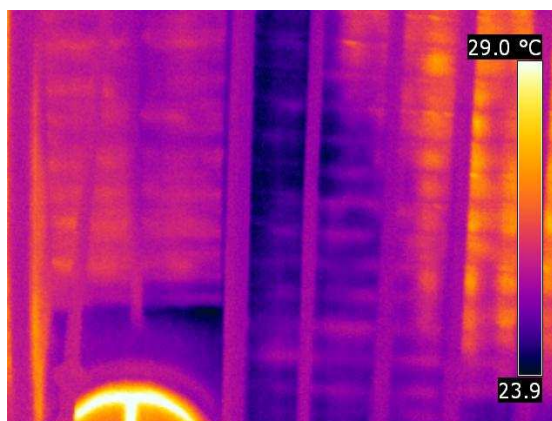


Figura B.12. Termografía del Crucero (II).

### **B.3.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y del tiempo de transmisión de ultrasonidos**

Tras realizar los ensayos de termografía se realizan ensayos de determinaciones de contenido de humedad y medidas de tiempos de transmisión de ondas ultrasónicas, mediante la metodología desarrollada por Rodríguez Liñán C y Rubio De Hita, P (3) y empleando las ecuaciones de regresión desarrolladas en el presente trabajo.

La selección de los pares a ensayar se realiza tras la inspección visual y termográfica de la cubierta tomando las piezas que resultan más representativas según su nivel de deterioro o contenido de humedad (localizadas mediante la termografía). La elección de estas piezas permite extrapolar los resultados obtenidos al resto de la estructura.

*Nave Mayor:* En la Nave Mayor (zona A) se seleccionan varios pares dentro de cada zona:

Zona A1 (lateral derecho de la Nave Mayor). En esta zona se analizan 3 pares y un tirante (marcados como V1, V2, V3 y T4, respectivamente, en la Figura B.5). La elección de estos pares responde a su situación junto a los plafones deteriorados. Se analizan 2 pares deteriorados y 1 sano como patrón.

Zona A2 (lateral izquierdo de la Nave Mayor). Tras inspeccionar las catas realizadas y detectar un ataque de termitas en una de las probetas obtenidas en la cata C4 (Figura B.5) se plantea estudiar los 3 pares adyacentes a esta cata (marcados como V4, V5 y V6 en la Figura B.5)

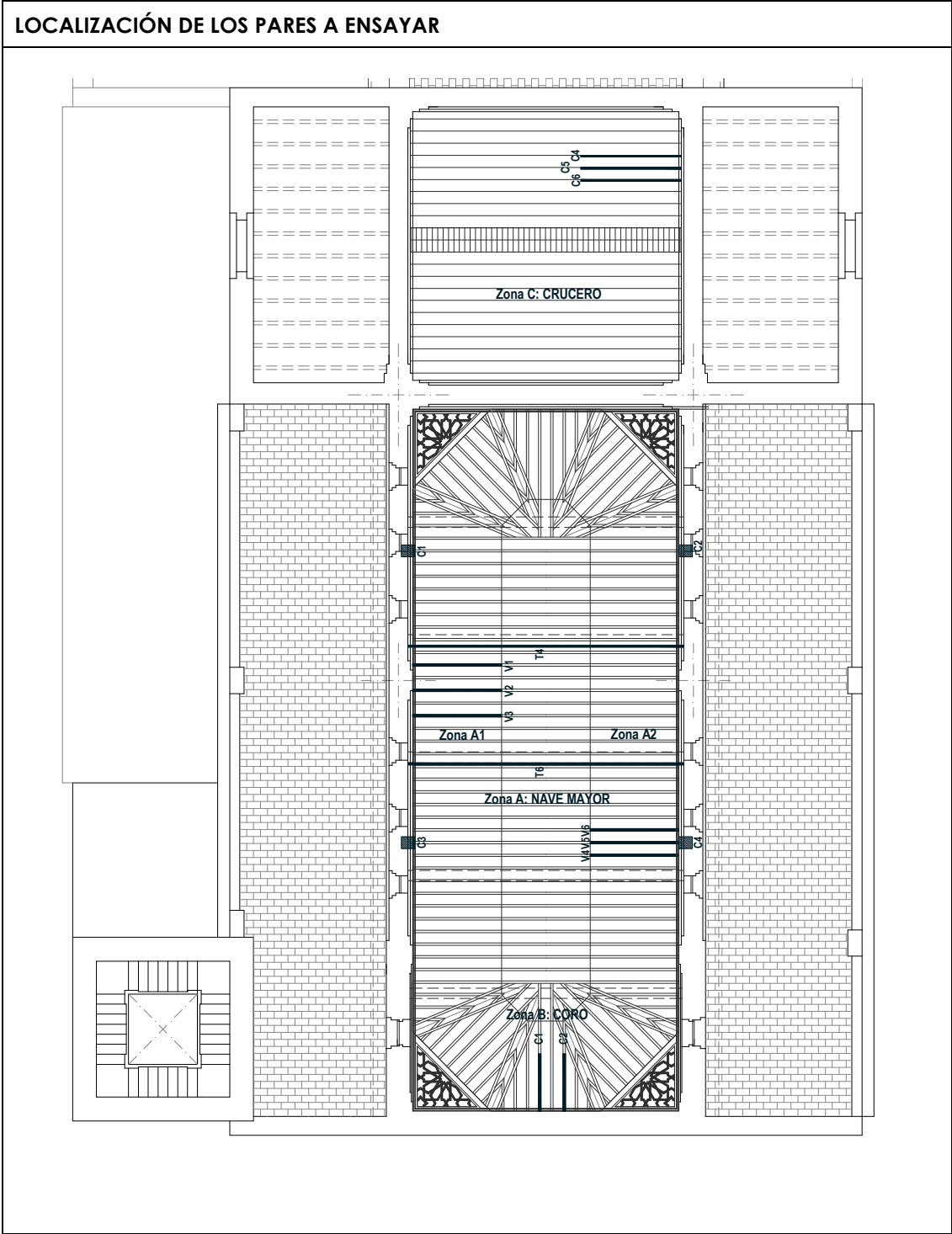
*Coro.* En el Coro (zona B) se estudian 2 pares (marcados como C1 y C2).

*Crucero.* En la zona del Crucero (zona C) se estudian 3 pares (marcados como C4, C5 y C6)

En cada par se realizan medidas de ultrasonidos en 3 secciones distintas (a 20, 50 y 120 cm del empotramiento). En cada una de las secciones se realizan mediciones en 3 alturas.

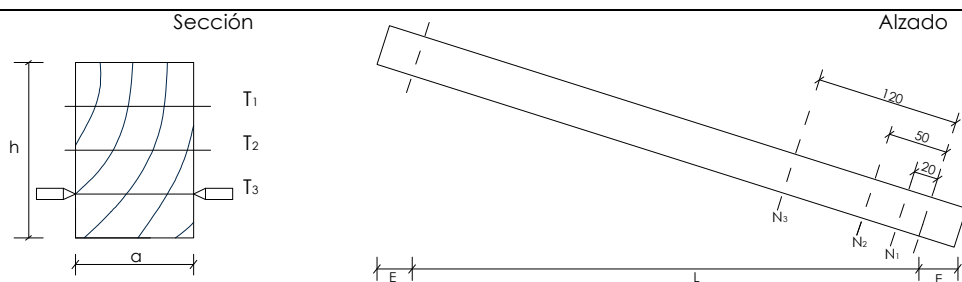
METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA CUBIERTA			
Luz de los pares (m)	4,00	Entrevigado (m)	0,37
Escuadría de los pares (cm)	9,5 x 13 (Nave Mayor y Coro), 6,5 x 14,5 (Crucero)		



## NAVE MAYOR: ZONA A1

## Mediciones perpendiculares a la fibra (normales)



## PAR V1

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	87,70	9,30
	T <sub>2</sub>	9,50	78,70	9,30
	T <sub>3</sub>	9,50	79,80	9,30
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	90,00	9,30
	T <sub>2</sub>	9,50	62,60	9,30
	T <sub>3</sub>	9,50	87,50	9,30
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	--	--
	T <sub>2</sub>	9,50	--	--
	T <sub>3</sub>	9,50	--	--

## PAR V2

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	92,00	8,90
	T <sub>2</sub>	9,50	86,30	8,90
	T <sub>3</sub>	9,50	77,90	8,90
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	121,00	9,50
	T <sub>2</sub>	9,50	88,10	9,50
	T <sub>3</sub>	9,50	78,00	9,50
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	92,60	9,40
	T <sub>2</sub>	9,50	87,50	9,40
	T <sub>3</sub>	9,50	89,00	9,40

## PAR V3

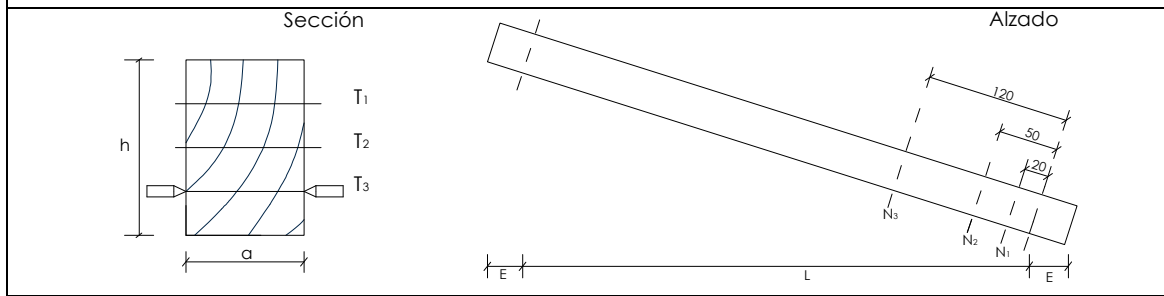
Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	87,20	8,60
	T <sub>2</sub>	9,50	84,00	8,60
	T <sub>3</sub>	9,50	54,60	8,60
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	94,70	8,40
	T <sub>2</sub>	9,50	78,70	8,40
	T <sub>3</sub>	9,50	51,60	8,40
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	86,90	8,60
	T <sub>2</sub>	9,50	86,30	8,60
	T <sub>3</sub>	9,50	75,50	8,60

## TIRANTE T4

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	74,50	8,60
	T <sub>2</sub>	9,50	46,70	8,60
	T <sub>3</sub>	9,50	86,10	8,60
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	57,80	9,40
	T <sub>2</sub>	9,50	44,40	9,40
	T <sub>3</sub>	9,50	64,50	9,40
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	61,40	8,40
	T <sub>2</sub>	9,50	45,50	8,40
	T <sub>3</sub>	9,50	61,30	8,40

## NAVE MAYOR: ZONA A2

## Mediciones perpendiculares a la fibra (normales)



## PAR V4

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	50,20	8,40
	T <sub>2</sub>	9,50	54,00	8,40
	T <sub>3</sub>	9,50	91,00	8,40
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--

## PAR V5

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	55,50	8,70
	T <sub>2</sub>	9,50	54,60	8,70
	T <sub>3</sub>	9,50	49,70	8,70
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--

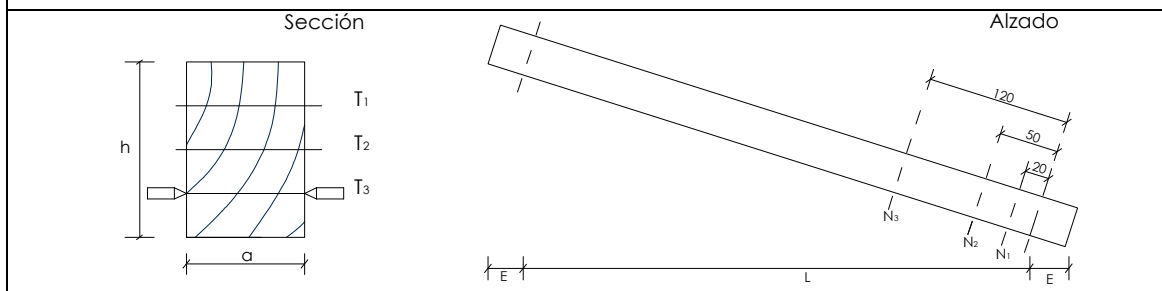
## PAR V6

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	68,90	9,60
	T <sub>2</sub>	9,50	62,50	9,60
	T <sub>3</sub>	9,50	56,90	9,60
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	--	--	--
	T <sub>2</sub>	--	--	--
	T <sub>3</sub>	--	--	--



## CORO

## Mediciones perpendiculares a la fibra (normales)

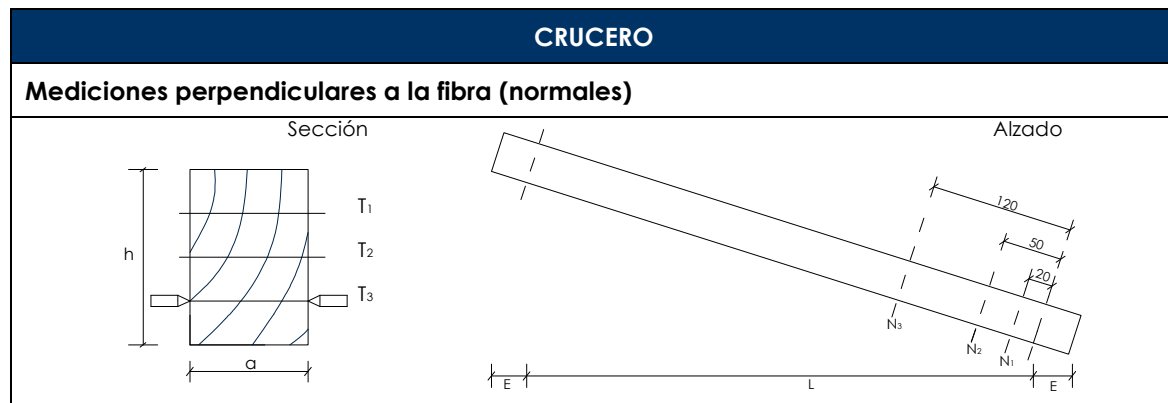


## PAR C1

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	50,20	9,70
	T <sub>2</sub>	9,50	61,30	9,70
	T <sub>3</sub>	9,50	64,40	9,70
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	50,00	9,60
	T <sub>2</sub>	9,50	62,70	9,60
	T <sub>3</sub>	9,50	62,60	9,60
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	53,50	9,50
	T <sub>2</sub>	9,50	60,70	9,50
	T <sub>3</sub>	9,50	62,60	9,50

## PAR C2

Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	45,90	9,70
	T <sub>2</sub>	9,50	54,70	9,70
	T <sub>3</sub>	9,50	69,10	9,70
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	46,00	9,80
	T <sub>2</sub>	9,50	48,60	9,80
	T <sub>3</sub>	9,50	60,60	9,80
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	9,50	43,10	9,30
	T <sub>2</sub>	9,50	51,00	9,30
	T <sub>3</sub>	9,50	69,40	9,30



PAR C4				
Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	40,00	8,50
	T <sub>2</sub>	6,50	36,30	8,50
	T <sub>3</sub>	6,50	35,20	8,50
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	40,00	8,40
	T <sub>2</sub>	6,50	30,70	8,40
	T <sub>3</sub>	6,50	36,80	8,40
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	43,50	8,60
	T <sub>2</sub>	6,50	31,50	8,60
	T <sub>3</sub>	6,50	41,40	8,60

PAR C5				
Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	37,80	8,40
	T <sub>2</sub>	6,50	33,00	8,40
	T <sub>3</sub>	6,50	46,80	8,40
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	41,10	8,70
	T <sub>2</sub>	6,50	34,00	8,70
	T <sub>3</sub>	6,50	43,50	8,70
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	40,40	8,50
	T <sub>2</sub>	6,50	38,70	8,50
	T <sub>3</sub>	6,50	42,00	8,50

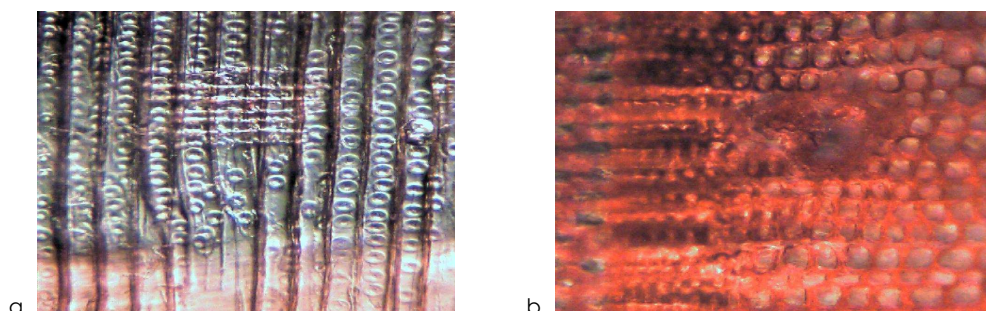
PAR C6				
Sección	Altura	Separación (a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	39,70	8,40
	T <sub>2</sub>	6,50	36,80	8,40
	T <sub>3</sub>	6,50	42,70	8,40
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	40,50	8,40
	T <sub>2</sub>	6,50	34,50	8,40
	T <sub>3</sub>	6,50	42,60	8,40
N <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	6,50	39,80	8,40
	T <sub>2</sub>	6,50	34,40	8,40
	T <sub>3</sub>	6,50	43,40	8,40

### B.3.3. TOMA DE MUESTRAS. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para complementar los trabajos in situ se realizaron varios ensayos en laboratorio.

#### B.3.3.1. Identificación anatómica de la especie

Se consideró necesario identificar anatómicamente la especie de madera de la estructura. De este modo sería posible aplicar las correlaciones propias para la especie extraídas previamente en este trabajo de investigación. La identificación microscópica desveló que la madera usada en la estructura era *Pinus Nigra* Arnold, una especie de coníferas como se identificó en la inspección visual.



**Figura B.13:** Identificación microscópica de la especie (a. Vista radial. b. Vista transversal)

#### B.3.3.2. Determinación de la densidad aparente

A partir de las pequeñas probetas extraídas de la cata C4 se determinó la densidad aparente de la madera como la relación entre la masa y el volumen de las mismas.

#### B.3.3.3. Medición de velocidad de ultrasonidos y determinación de la resistencia a flexión

La medición de la velocidad de ultrasonidos y los ensayos de determinación de la resistencia a flexión se realizan sobre las probetas anteriores. Se trata de pequeñas probetas con unas dimensiones de 20x20x300 mm y libre de defectos.

Mediante la medición de las velocidades de ultrasonidos se pretende estimar un valor de resistencia a flexión, empleando las correlaciones obtenidas en este trabajo de investigación. Asimismo, los ensayos de rotura (4) permiten obtener una aproximación real de este parámetro. No obstante, los resultados obtenidos mediante este procedimiento no son directamente extrapolables a las piezas que componen la estructura del edificio pues deben tenerse en cuenta el "efecto del tamaño" de las piezas y sus defectos. La comparación de los valores de rotura (MOR) obtenidos por ambos métodos (estimado mediante los valores de velocidad de ultrasonidos y a partir de los ensayos de rotura) probar la fiabilidad de las correlaciones halladas.

A continuación se muestran los resultados de todos los ensayos.

**Tabla B.4.** Valores de densidad aparente, velocidad de ultrasonidos y carga de rotura obtenidos en las probetas.

PROBETA Nº	DENSIDAD APARENTE (Kg/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s)	CARGA DE ROTURA (N)
1	490	5095,96	2110
2	480	2588,77	1630
3	470	3217,16	2010
4	460	4441,05	1680
5	--	4910,67	2020
6	--	3161,19	1640

## **B.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO**

### **B.4.1. INSPECCIÓN VISUAL**

De la inspección visual de la cubierta de madera de la Iglesia de Ntra. Sra. de los Dolores se deduce que, en general, se trata de una madera con una gran cantidad de defectos (nudos de gran tamaño y fendas de secado de gran longitud).

En cuanto al deterioro producido por agentes xilófagos cabe destacar:

- Existe un ataque de carcoma pequeña generalizado aunque no intenso que afecta a la parte más superficial de los elementos con galerías de hasta 2 mm de diámetro. Asimismo, se ha localizado un ataque por carcoma grande en uno de los pares del Crucero con galerías de hasta 10 mm de diámetro.
- Se ha detectado un ataque de termitas en una de las calicatas. No obstante, no hay signos externos de la existencia de estos xilófagos en la madera de la cubierta.
- Existe un ataque de hongos de pudrición parda en las zonas que han tenido un aporte de humedad elevado debido a filtraciones por fallos de la cubierta o movimientos del muro de la cabecera.

Coro. En el Coro este ataque afecta principalmente al empotramiento de los pares, la tablazón y el arrocabe en las zonas próximas al muro del testero.

Nave Mayor. En la Nave Mayor el ataque afecta fundamentalmente a la tablazón del lateral derecho (zona denominada A1 en los planos) y a alguno de los pares.

#### **B.4.1.1. Clasificación visual según la norma UNE 56544:2007**

Según los criterios de clasificación visual de la norma UNE 56544:2007, los pares que componen la cubierta de la Iglesia presentan una calidad estructural no superior a ME-2. Su correspondencia con el actual patrón de clases resistentes equivale a una clase resistente C18. Asimismo, según los criterios de clasificación visual de esta norma de clasificación, muchas de las piezas quedan excluidas de las calidades aptas para uso estructural por lo que no se establece correspondencia con ninguna clase resistente.

### **B.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS**

La campaña de ensayos no destructivos arroja los siguientes resultados.

#### **B.4.2.1. Ensayos de termografía de infrarrojos**

Los ensayos realizados con termografía han permitido localizar zonas con contenidos de humedad elevados que, inicialmente en la inspección visual, no fueron detectadas. La detección de estas humedades posibilitó la localización de filtraciones de la cubierta.

Nave Mayor. El termograma 1 (Figura B.11) muestra una termografía general de la Nave Mayor. En la imagen se aprecia como uno de los faldones presenta temperaturas superiores al resto de la cubierta. Este hecho responde a la orientación del faldón, afectado por el soleamiento natural en el momento en el que se toma la imagen termográfica. En el resto de los faldones se aprecian tonalidades más oscuras en los empotramientos lo que revela la presencia de humedades en estas zonas.

Crucero. Los termogramas 2 y 3 (Figuras B.12 y B.13) muestran termografías de zonas puntuales del Crucero. En ambos termogramas se detectan tonalidades más oscuras que

representan zonas de menor temperatura. Esta diferencia de temperaturas refleja la presencia de humedades localizadas producidas por filtraciones puntuales.

La humedad es un parámetro que altera las propiedades térmicas de la madera. Esta diferencia de humedad se traduce en una diferencia térmica entre la zona humedecida y la zona seca. El agua presente en la madera causa un incremento del calor específico, la conductividad y la densidad del material (2) lo que conlleva a que sea necesaria una mayor cantidad de energía para calentar la pieza.

#### **B.4.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad y velocidad de ultrasonidos**

Los resultados de los ensayos de determinación del contenido de humedad y del tiempo de transmisión de ultrasonidos se recogen a continuación. En todos los casos, el contenido de humedad es bajo, con un valor medio de 9%. En cuanto a los resultados de velocidad de ultrasonidos no se detectaron pérdidas de densidad por lo que para cada elemento se aporta un valor de velocidad de medio ( $V_N$  media), como valor representativo de la pieza. En todos los casos se alcanzó un valor medio superior a 1200 m/s (en uno de los pares de la Nave Mayor se alcanzó un valor muy próximo). Este hecho indica, según los valores de diagnóstico aportados en el presente trabajo, que se trata de una madera sana.

La metodología de inspección mediante ultrasonidos aplicada a este edificio indica que, si la madera está sana, deben emplearse valores de velocidad de ultrasonidos longitudinal a la fibra ( $V_L$ ) para estimar sus propiedades resistentes. Así, a partir de los valores de velocidad perpendicular a la fibra ( $V_N$ ) aportados, se obtiene un valor de velocidad longitudinal estimado ( $V_L$  estimado) a partir del cual, y del valor de densidad estimado en laboratorio, se obtiene la resistencia a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) de los elementos.

La estimación de la clase resistente de cada elemento en función de su resistencia a flexión permite asignar una clase resistente al conjunto C30 (5). No obstante, este resultado debe penalizarse en función de los defectos de las piezas dado que las correlaciones empleadas son extraídas a partir de piezas que, aunque son de tamaño real, están libres de defectos. Como referencia puede asignarse el valor de clase resistente aportado por la norma de clasificación visual, C18. En cuanto al valor de la clase resistente asignado según el módulo de elasticidad, los resultados son más heterogéneos. Se encuentran piezas a las que es posible asignar una clase resistente C14 y otras a las que es posible asignar clases resistentes muy elevadas como C45. El desglose de resultados se muestra en la Tabla B.5.

**Tabla B.5.** Resultados de los ensayos de ultrasonidos.

ZONA/ PAR Nº		VELOC. NORMAL MEDIA <sup>1,2</sup>	VELOC. LONGIT. ESTIMADA <sup>1,2</sup>	RESISTENCIA A FLEXIÓN <sup>1</sup> / CORRECCIÓN POR TAMAÑO DE MUESTRA <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE POR RESISTENCIA A FLEXIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD
Nave	V1	1273,75	3471,76	52,81 / 31,68	4718,74	<b>C30 / C14</b>
Nave	V2	1136,29	3109,06	51,11 / 30,66	3927,16	<b>C30 / C14</b>
Nave	V3	1310,39	3596,49	53,44 / 32,06	5011,12	<b>C30 / C14</b>
Nave	V4	1578,8	4312,34	57,47 / 34,48	6888,75	<b>C35 / C22</b>
Nave	V5	1963,6	5321,20	64,39 / 38,63	10111,96	<b>C35 / C45</b>
Nave	V6	1679,1	4535,47	58,88 / 35,32	7543,49	<b>C35 / C24</b>
Coro	C2	1956,89	5271,33	64,02 / 38,41	9936,79	<b>C35 / C40</b>
Coro	C1	1801,88	4860,63	61,05 / 36,63	8556,73	<b>C35 / C30</b>
Crucero	C4	1913,72	5196,65	63,46 / 38,07	9677,51	<b>C35 / C40</b>
Crucero	C5	1788,93	4864,42	61,08 / 36,65	8568,98	<b>C35 / C35</b>
Crucero	C6	1800,01	4898,53	61,32 / 36,79	8679,41	<b>C35 / C35</b>

<sup>1</sup> La ecuación empleada para la estimación de la resistencia a flexión es  $MOR (N/mm^2) = 0,0015 E_d + 44,225$

<sup>2</sup> La norma UNE 384:2010 establece que el 5º percentil de la resistencia a flexión debe corregirse en función el tamaño de la muestra. En este caso debido al escaso número de piezas ensayadas establecemos la máxima penalización minorando la resistencia a flexión por el factor **0,6**.

<sup>3</sup> La ecuación empleada para la estimación del módulo de elasticidad es  $MOE (N/mm^2) = 0,6982 E_d + 721,38$

### B.4.3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Según la identificación microscópica se determinó que la madera de estructura es una madera de coníferas de la especie *Pinus nigra* Arnold. Esta identificación permitió referir todos los resultados de los ensayos realizados tanto in situ como en laboratorio a esta especie logrando una mayor aproximación de la información obtenida.

#### B.4.3.1. Determinación de la densidad aparente

Los valores de densidad aparente determinados en los ensayos se recogen a continuación. Refiriendo estos resultados en los ensayos de laboratorio a la especie *Pinus Nigra* Arnold la norma UNE-EN 338:2010 (6) asigna las siguientes clases resistentes:

**Tabla B.6.** Resultados de los ensayos de determinación de densidad.

PROBETA Nº	DENSIDAD APARENTE (Kg/m <sup>3</sup> )	CLASE RESISTENTE ASIGNADA
1	490	C35
2	480	C35
3	470	C30
4	460	C30

En todos los casos, los valores obtenidos permiten asignar un valor de clase resistente C30 o superior. No obstante, como se ha determinado en el presente trabajo de investigación, el valor de densidad es siempre superior al valor exigido por una clase resistente por lo que la densidad no limita la calidad de una población.

#### B.4.3.2. Medición de velocidad de ultrasonidos y determinación de la resistencia a flexión

Los valores de resistencia a flexión estimados a partir de las velocidades de ultrasonidos se recogen a continuación. Para determinar estos valores se han empleado las correlaciones obtenidas en este trabajo de investigación para la especie *Pinus Nigra* Arnold. Asimismo, se muestran los resultados de los ensayos de rotura de dichas probetas.

**Tabla B.7.** Valores de resistencia a flexión estimados a partir de las velocidades de ultrasonidos.

PROBETA Nº	VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MOR) ESTIMADA (N/mm <sup>2</sup> )	VALOR CARACTERÍSTICO (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
1	5095,96	67,51	40,51	C40
2	2588,77	48,46	29,08	C30
3	3217,16	53,23	31,94	C30
4	4441,05	62,53	37,52	C35
5	4910,67	66,10	39,66	C35
6	3161,19	52,81	31,69	C30

**Tabla B.8.** Resultados de los ensayos de flexión de las pequeñas probetas.

PROBETA Nº	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MOR) (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MOR) CORREGIDA POR "EFECTO DEL TAMAÑO" DE LA PROBETA (N/mm <sup>2</sup> )	VALOR CARACTERÍSTICO (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
1	94,95	63,30	37,98	C35
2	73,35	48,90	29,34	C30
3	90,45	60,30	36,18	C30
4	75,6	50,40	30,24	C30
5	90,9	60,60	36,36	C35
6	73,8	49,20	29,52	C30

Los resultados de los ensayos, tanto de ultrasonidos como de rotura, aportan unos valores de clases resistentes muy similares, C30 o superior. No obstante, en ambos casos los resultados deben penalizarse por diferentes cuestiones:

- Los valores de resistencia a flexión estimados mediante los valores de velocidad de ultrasonidos están calculados empleando correlaciones extraídas de ensayos con probetas libre de defectos.
- Los valores de resistencia a flexión determinados a partir de los ensayos de rotura están realizados en pequeñas probetas libres de defectos. En este caso, el "efecto del tamaño" se tiene en cuenta minorando el valor de resistencia obtenido, no así para el caso de los defectos.

## B.5. CONCLUSIONES

Este estudio se centra en la inspección y diagnóstico de la cubierta de un edificio protegido, la Iglesia de Ntra. Sra. de los Dolores. Para ello se realiza una inspección visual y una campaña de ensayos in situ empleando técnicas no destructivas como los ultrasonidos y la termografía. Asimismo, se realiza ensayos en laboratorio a partir de probetas extraídas de la propia estructura. Todas estas herramientas nos han permitido realizar un diagnóstico preciso. El uso de estas técnicas nos permite concluir:

- A partir de la inspección mediante termografía de infrarrojos se ha aportado información sobre distintos aspectos: zonas con distinto contenido de humedad y que, por tanto, pudieran presentar, en el momento de la inspección o en un futuro, signos de pudrición. También ha sido posible distinguir maderas de distinta densidad y/o espesor (tablazón y pares).
- Para obtener datos más precisos sobre la capacidad resistente de la madera o sobre la pérdida de densidad por pudrición o ataque de xilófagos en el interior ha sido necesario recurrir al uso de una técnica complementaria, los ultrasonidos. Los ultrasonidos se presentan como una técnica eficaz para establecer un diagnóstico sobre el estado de conservación de una estructura de madera permitiendo estimar su clase resistente y/o su grado de deterioro, si existiera.
- Todos los ensayos realizados, medición de velocidad de ultrasonidos, determinación de los valores de densidad así como los ensayos de rotura realizados en laboratorio permiten asignar un valor de clase resistente C30 o superior. Por el contrario, según los criterios de la norma de clasificación visual UNE 56544:2007 debe asignarse una clase resistente no superior a C18. Esta divergencia de resultados se explica por el efecto de los defectos sobre los valores de resistencia a flexión de las piezas. Las correlaciones de velocidad de ultrasonidos empleadas han sido extraídas a partir de piezas de tamaño estructural pero libre de defectos<sup>4</sup>. De la misma forma, los ensayos de rotura se realizan sobre pequeñas probetas libre de defectos. En el caso de la densidad, en el presente trabajo de investigación se ha determinado que el valor de densidad siempre es superior al valor establecido por la clase resistente, por lo que la densidad no limita la calidad de una población.
- Aunque el uso de técnicas no destructivas puede ser muy útil en la evaluación del estado de conservación de una estructura de madera, estas técnicas no pueden sustituir a la investigación inicial basado en el análisis visual. Ambos pueden complementarse entre sí en la obtención de información fiable tanto como sea posible para cualquier proyecto de restauración o conservación.

<sup>4</sup> En el presente trabajo de investigación se han extraído las correlaciones entre los ensayos de ultrasonidos y las propiedades mecánicas de la madera para las especies *Pinus Sylvestris* L y *Pinus Nigra* Arnold. Para esta última los ensayos se realizan únicamente sobre probetas de tamaño estructural aunque libre de defectos, lo que corresponde a una calidad visual ME-1 según la norma de clasificación visual.

## Referencias

- (1) UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural-Maderas de coníferas.
- (2) Ludwig, N, Redaelli, V, Rosina, E, Augelli, F. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. Infrared Physics & Technology Vol. 46. (2004), pp. 161-166.
- (3) Rodríguez Liñán C. Rubio de Hita P. "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla Secretariado de Publicaciones, 2000.
- (4) UNE 56537:1979. Características físico mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la flexión estática.
- (5) UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- (6) UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.



## **ANEJO-C**

**INSPECCIÓN DE LA CUBIERTA DE UNA  
NAVE LATERAL DE LA IGLESIA NTRA.  
SRA. DE LA GRANADA (MOGUER)**

En este anejo se desarrolla el estudio de la cubierta de madera de una de las naves laterales de la Iglesia Ntra. Sra. de la Granada de Moguer. Este estudio se acomete en varias etapas:

1. Estudio de la planimetría del edificio.
2. Inspección in situ.
  - Fase 1: Inspección visual.
  - Fase 2: Ensayos no destructivos:
    - Termografía
    - Xilohigrómetro
    - Ultrasonidos
    - Resistografía
3. Análisis de los datos obtenidos. Diagnóstico.

### C.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

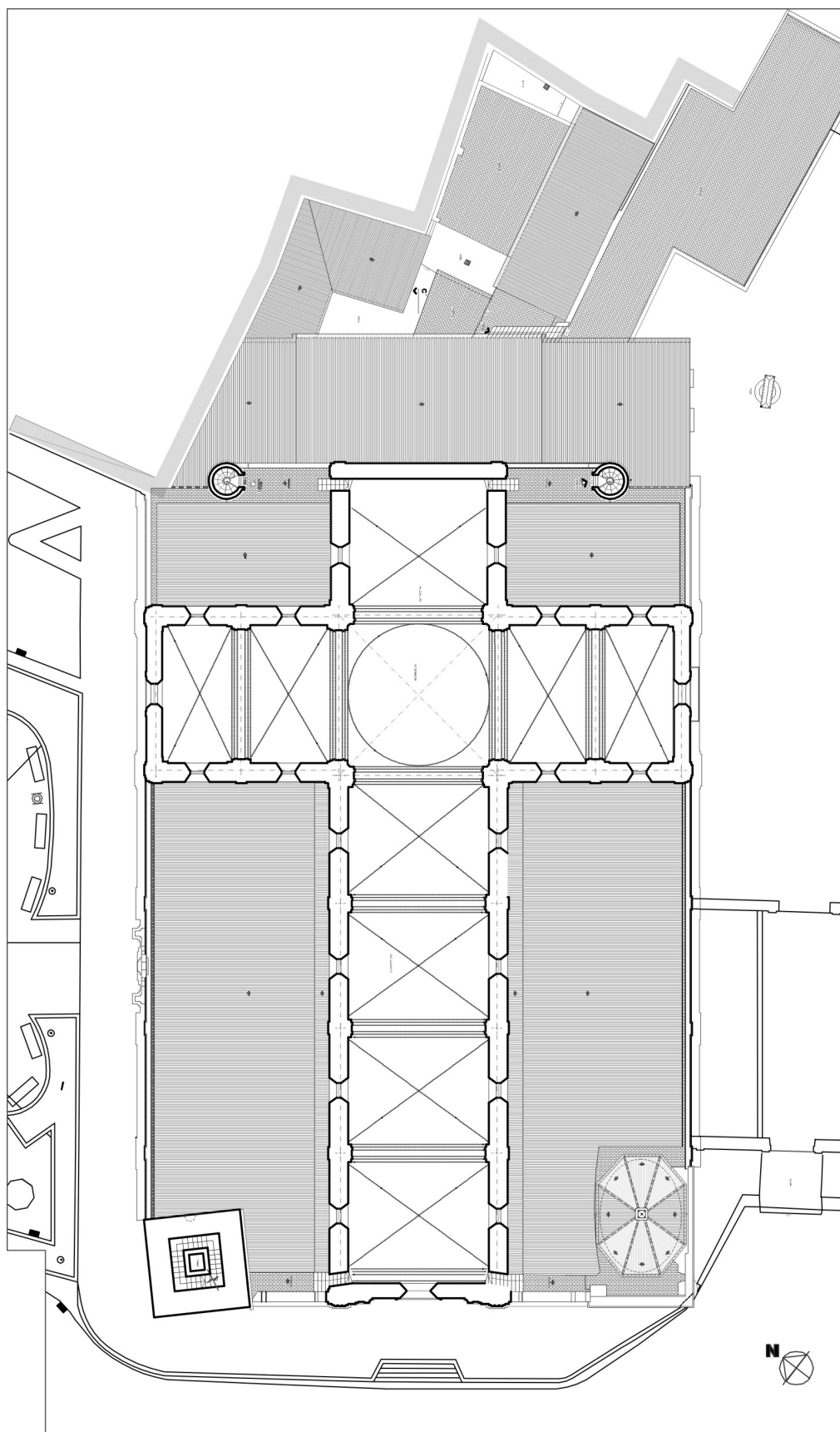
La Iglesia Parroquial Santa María de Granada de Moguer era originalmente un edificio medieval pequeño que quedó arruinado por el terremoto de 1755. En 1760 el arquitecto Pedro de Silva empezó su reconstrucción sobre nuevas trazas, que dieron lugar al actual edificio de aspecto catedralicio. El proyecto fue ultimado en 1770 por el arquitecto diocesano José Álvarez.

La Iglesia, de planta de salón, consta de cinco naves. Tanto la principal como las extremas están cubiertas por bóvedas de arista; las colaterales por bóvedas vaídas. En el teórico crucero se eleva una cúpula de media naranja sobre tambor, semiesférica en el interior y poligonal octogonal en el exterior, con escaso volumen. La nave principal termina con testero plano. La decoración interior es a base de pilastras cajeadas de orden corintio. Es característica de Pedro de Silva la presencia de la torre campanario en el interior del rectángulo de la planta, a los pies del Evangelio.

Lo más llamativo de la Iglesia está en el exterior. La torre, una de las más destacadas en la provincia, es una emulación de la Giralda de Sevilla en la composición de los cuerpos superiores, como tantas otras de la época. Fue diseñada también por Pedro de Silva y reconstruida algo antes que el resto de la Iglesia: entre 1758 y 1760. Su parte más característica es el cuerpo de campanas, en alternancia serliana-palladiana, con decoración cerámica y enfoscado de ladrillo, y rematado con la imagen de la Fe. El estilo barroco se identifica en los efectos ilusionistas que se consiguen al pintar campanas en los muros ciegos del segundo cuerpo. A José Álvarez se deben las portadas de ladrillo limpio, de estilo próximo al Neoclasicismo (1).



Figura C.1. Imagen aérea. Localización de la Iglesia.



**Figura C.2.** Planta de la Iglesia por nave central.

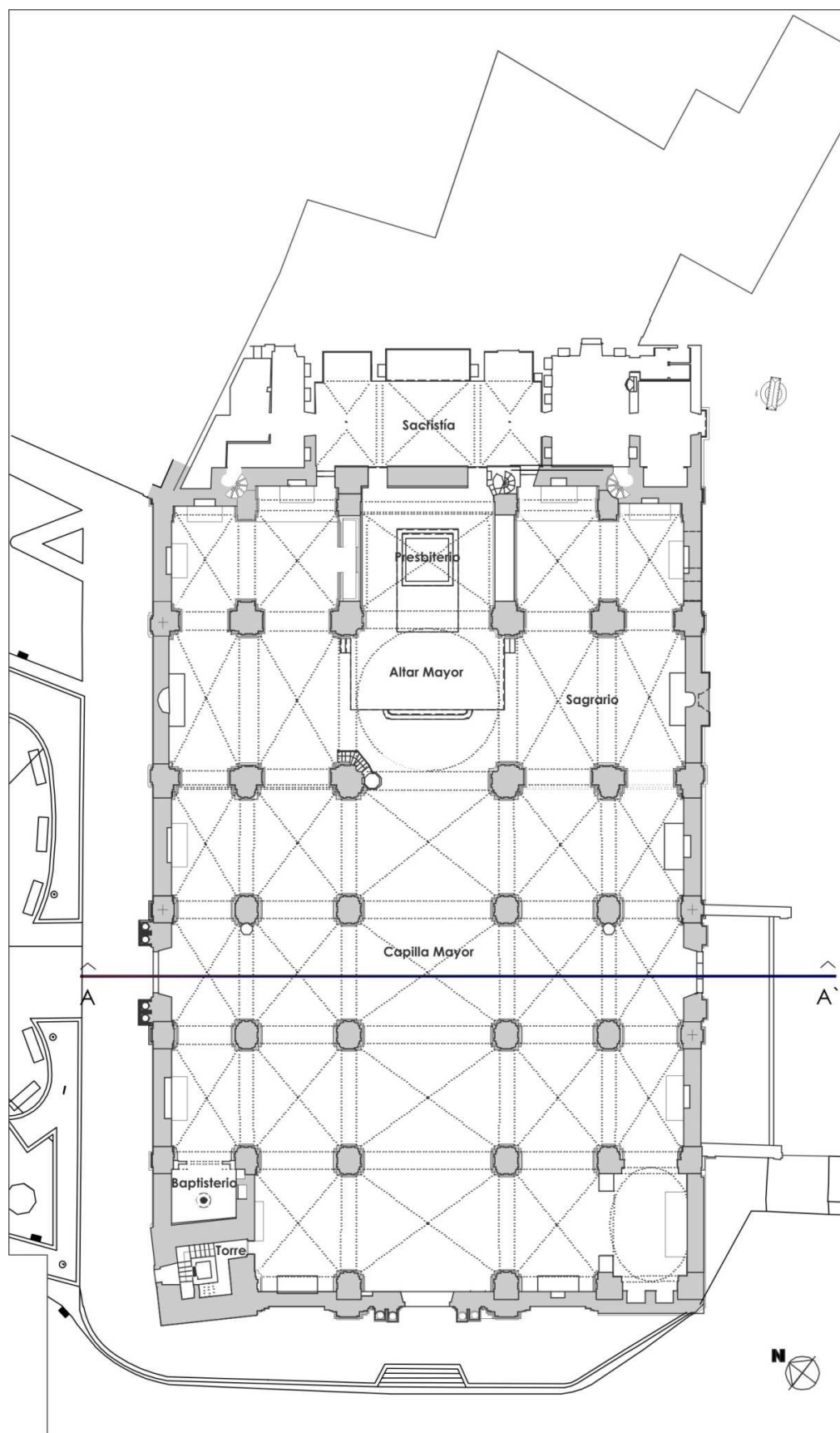


Figura C.3. Planta baja.





Figura C.4. Sección A-A'.

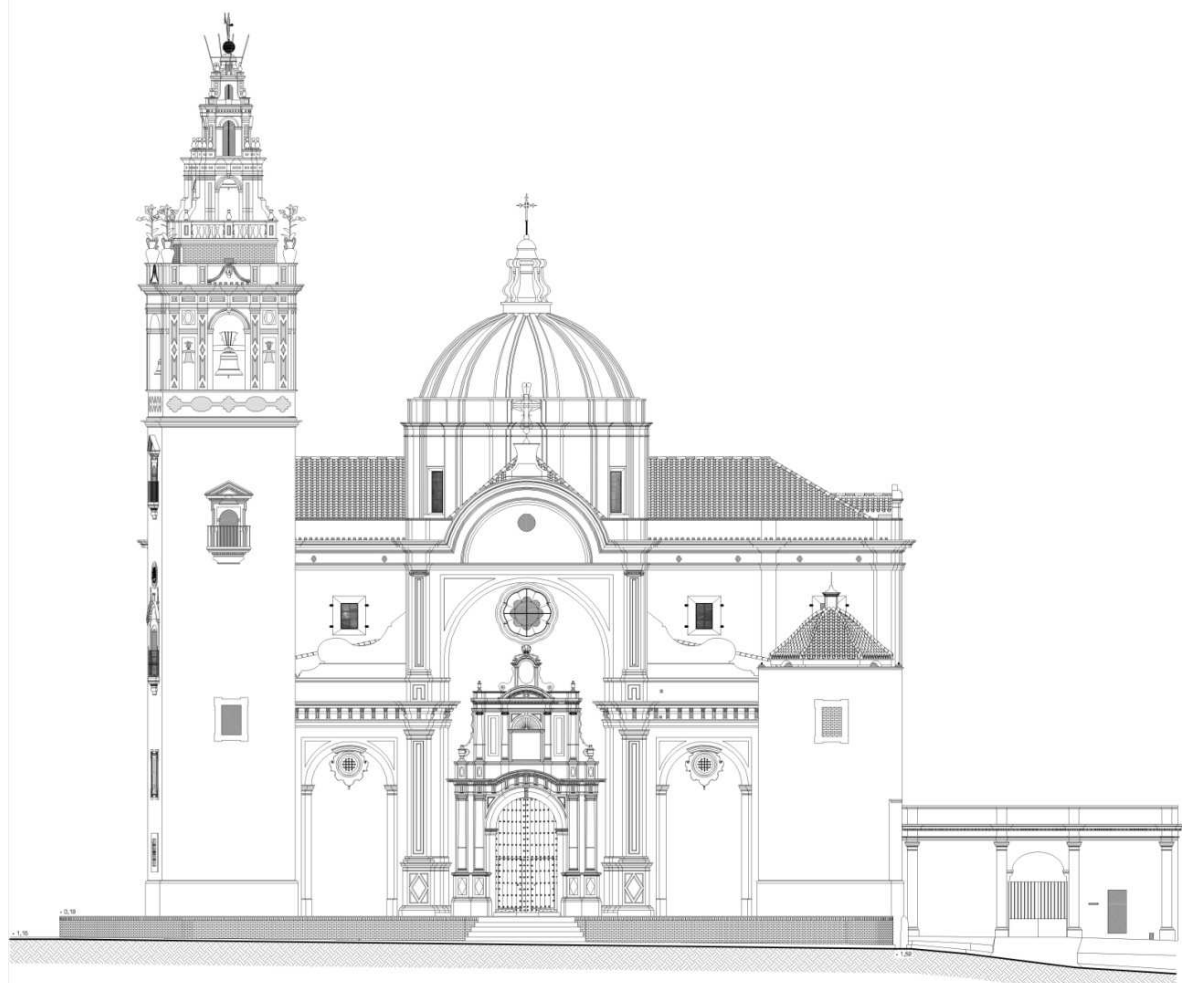


Figura C.5. Alzado Principal.

## C.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: LA CUBIERTA DE MADERA DE UNA DE LAS NAVES LATERALES (PATIO DE LOS NARANJOS)

La cubrición de la Iglesia de Ntra. Sra. de la Granada está resuelta con cubiertas inclinadas. En origen estas cubiertas fueron realizadas con una estructura de madera de ladrillo con tabla apoyadas sobre pares con una escuadría de 14x28 cm y un interejo de 45 cm. Sobre esta estructura se coloca un relleno de mortero y la cubrición con teja cerámica. Hoy día, esta estructura original solo se conserva en 2 de las naves laterales. El resto de naves han sido sustituidas por una estructura metálica ligera, como resultado del incendio sufrido durante la Guerra Civil Española (1936-1939).

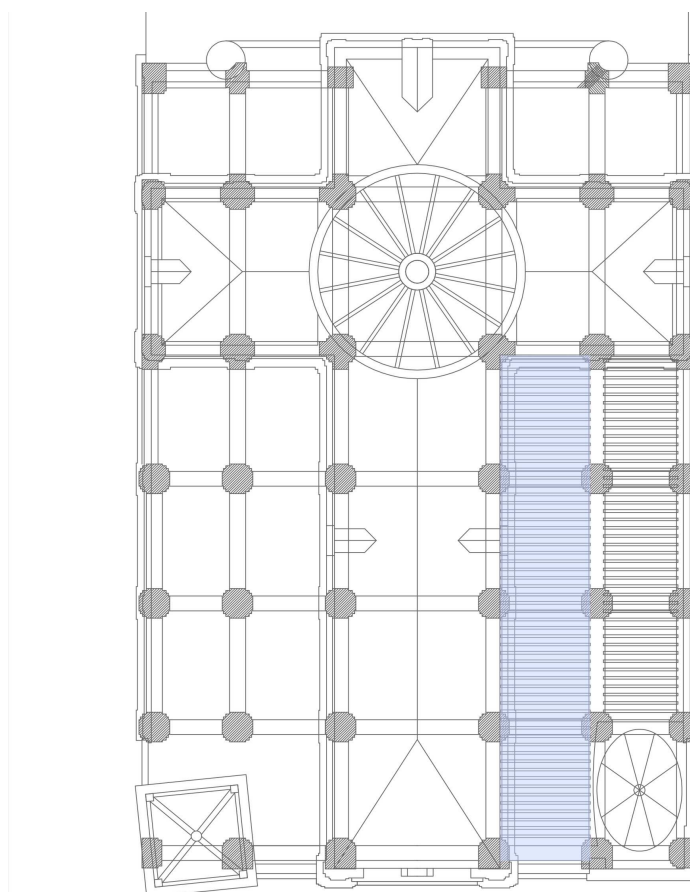


Figura C.6. Localización de la nave lateral a inspeccionar.

## C.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Mediante el estudio de la cubierta de la nave lateral se pretende evaluar el estado de conservación de la madera de esta estructura original. Para ello se sigue un procedimiento de análisis desarrollado en varias etapas:

- Fase 1: Inspección visual. A partir de la inspección visual es posible determinar los principales aspectos de la estructura. Así es posible determinar la geometría y dimensiones de los elementos, su especie (conífera o frondosa) y calidad (mediante la medición de defectos como nudos y fendas), su acabado superficial o la existencia de reparaciones previas. En cuanto a su estado de conservación es posible detectar posibles alteraciones biológicas.
- Fase 2: Realización de ensayos no destructivos: termografía, xilohigrómetro, ultrasonidos y resistografía. A partir de los ensayos no destructivos es posible determinar las características mecánicas de la madera y la extensión real de los daños.

### C.3.1. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual determina que se trata de una cubierta a un agua formada por pares de 4,5 m de longitud con un apoyo intermedio soportado por jabalcones situados a 1,5 m del apoyo. La escuadría de los pares es 14x28 cm con un intereje de 45 cm.

En cuanto a la especie de madera se trata de una conífera (probablemente *Pinus Sylvestris* L o *Pinus Nigra* Arnold) con pocos nudos, aunque es notable la presencia de algunas fendas de longitud y apertura considerables.

El aspecto exterior de la madera revela la presencia de un contenido de humedad ambiente elevado. Esta humedad ambiente se ha trasladado a la madera y se ha traducido en un color blanquecino acompañado de una pelusa superficial. Esta situación se ha generado como resultado de un espacio bajo cubierta abierto al exterior, como es el caso de esta nave.

En cuanto al deterioro producido por agentes xilófagos se encontraron evidencias de ataques producidos por los siguientes organismos:

- *Carcoma pequeña*. Su ataque es generalizado aunque no muy intenso con galerías de un diámetro medio de 2 mm.
- *Pudrición parda*. Aparecen síntomas de pudrición parda en el empotramiento de algunos de los pares en los muros. Este tipo de lesión siempre va asociada a un contenido de humedad de la madera muy elevado producido, en este caso, por filtraciones de la cubierta. Hay que tener en cuenta que la pudrición facilita la digestión de la madera del duramen a la carcoma pudiendo producirse un ataque combinado que dañaría de manera severa a la misma.



**Figura C.7.** Vista general de la cubierta.



**Figura C.8.** Aspecto blanquecino de los pares debido al elevado contenido de humedad ambiente.





**Figura C.9.** Pudrición de la madera en los empotramientos.



**Figura C.10.** Ataque de carcoma común.



**Figura C.11.** Fenda de gran apertura que recorre toda la longitud del par.

### C.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA. TOMA DE DATOS

Se realizan ensayos no destructivos en los pares de la primera y segunda bóveda de la nave (zonas A y B) y sobre los pares situados entre las mismas (zonas C y D). La inspección de la cubierta de las restantes bóvedas se descarta por el estado de deterioro de las bóvedas, con importantes grietas, que hacen arriesgado el acceso.

En estas zonas se realizan ensayos de termografía, determinación del contenido de humedad, medición de la velocidad ultrasónica y resistografía. A partir de estos ensayos se pretende determinar las características mecánicas de la madera y la extensión de los daños.

#### C.3.2.1. Ensayos de termografía

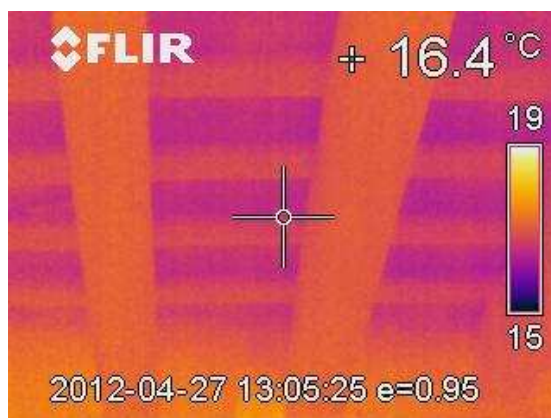
Los ensayos de termografía de infrarrojos se realizan en el interior de la nave para localizar posibles humedades por filtración de la cubierta (2, 3). Las condiciones ambientales durante la inspección realizada se recogen en la Tabla C.1. La hora de ensayo fue aproximadamente las 13 horas.

**Tabla C.1.** Condiciones ambientales del día de la inspección.

DÍA	Tª MÍNIMA (°C)	Tª MÁXIMA (°C)	Tª HORA ENSAYO (°C)	VELOCIDAD VIENTO (Km/h)
27 abril	12	16	26	Suroeste (1)

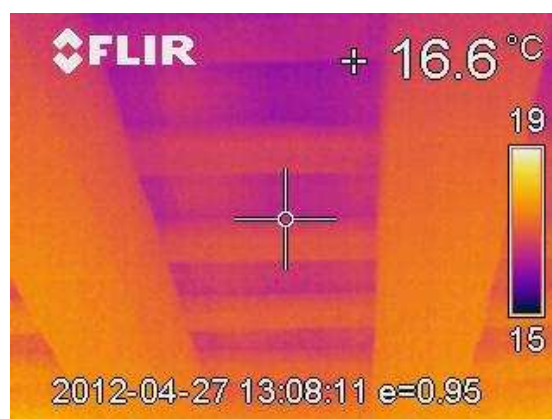
La configuración del espacio interior del bajo cubierta (mostrado en la inspección visual) impidió tomar imágenes más generales de toda la estructura. Los termogramas solo pudieron tomarse por zonas.

Termograma 1. Termografía de los pares y de la estructura de cubierta de ladrillo por tabla.



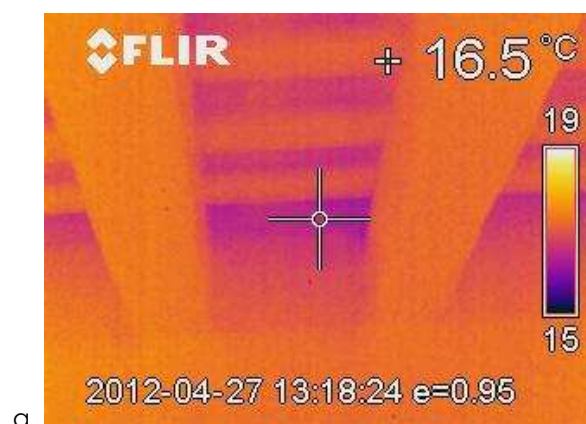
**Figura C.12.** Estructura de cubierta de pares y ladrillo por tabla.

Termograma 2. Termografía de las humedades existentes en la zona superior de la cubierta.

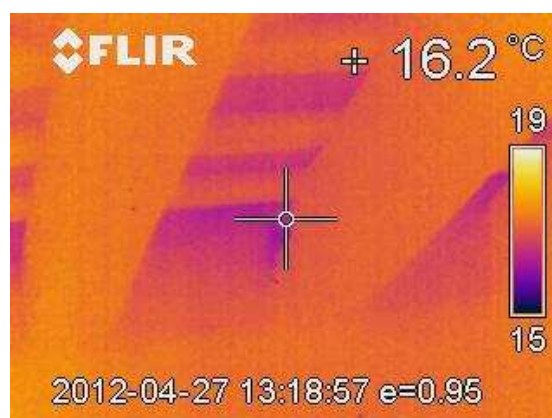


**Figura C.13.** Humedades existentes en los ladrillos situados sobre los pares.

Termograma 3. Humedades en los empotramientos de los muros.



a.



b.

**Figura C.14.** Humedades en los empotramientos.

**C.3.2.2. Ensayos de ultrasonidos y medición del contenido de humedad (xilohigrómetro)**

Tras realizar un análisis termográfico general se acometen ensayos de ultrasonidos. La toma de datos se realiza a partir de mediciones perpendiculares a la dirección de la fibra de las piezas siguiendo la metodología desarrollada por Rodríguez Liñán C y Rubio De Hita, P (4). Estas mediciones permitirán identificar zonas con pérdidas de densidad internas y su extensión. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

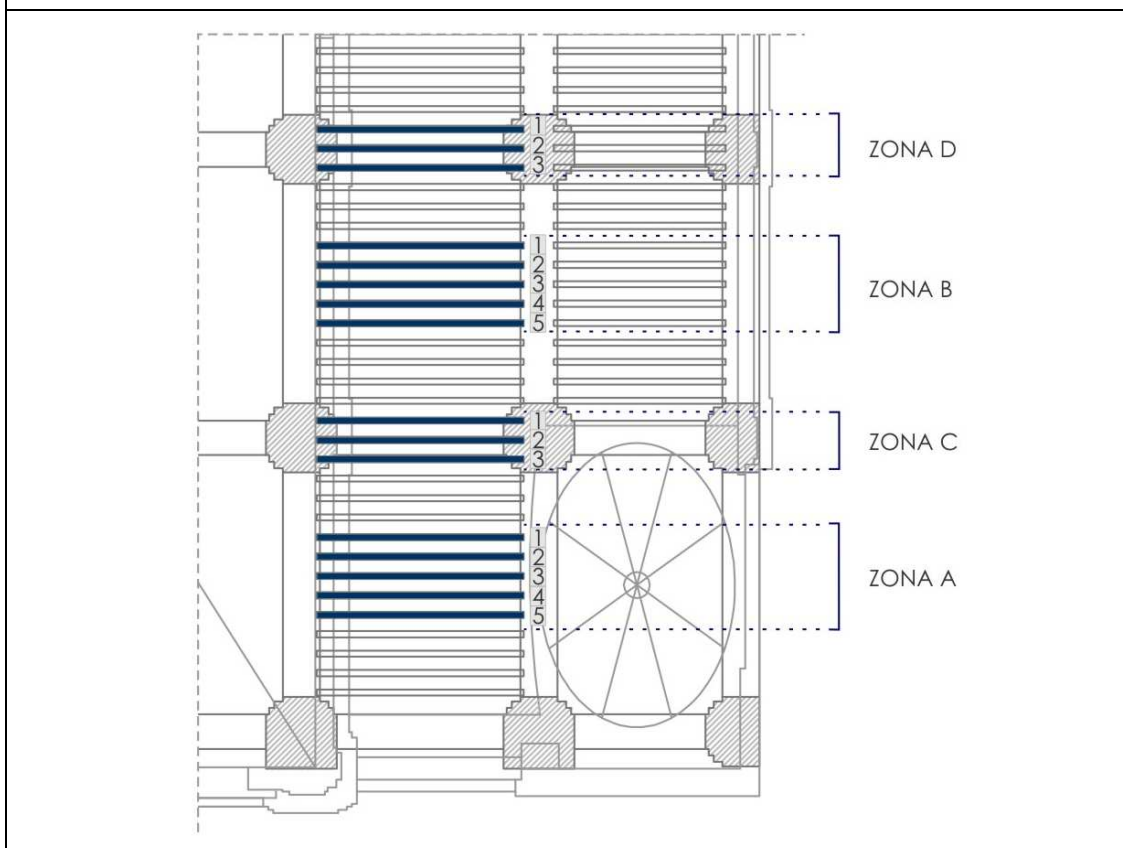
El número de vigas a ensayar en el forjado se determina según lo establecido en el Plan de Muestreo Estadístico contenido en la norma ISO 3443-7:1988 (5).

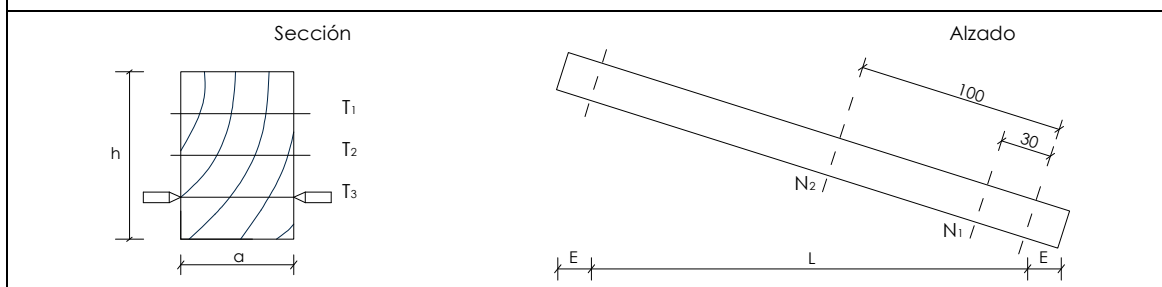
Según la norma ISO 3443-7:1988 debe elegirse uno de los tres Niveles de Confianza Aceptables (NCA) entre 4, 6,5 y 10 %. La elección de un NCA se realiza en función de la fiabilidad que se precise en la aplicación de los resultados obtenidos. A medida que reducimos el NCA, la posibilidad de que aparezca un valor diferente es menor.

Cada una de las bóvedas de la nave de cubierta está formada por 12 pares. De este modo, para un Nivel de Confianza Aceptable (NCA) del 4%, el tamaño de la muestra a estudiar viene determinada por una única familia de 3 elementos. No obstante, para aumentar la fiabilidad de la inspección aumentamos el número de elementos a ensayar hasta un total de 5 en cada bóveda y 3 en los espacios de separación entre las mismas.

**METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN****CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA CUBIERTA**

Luz de los pares (m)	4,80	Entrevigado (m)	0,45
Escuadría de los pares (m)	0,14 x 0,28		

**LOCALIZACIÓN DE LAS VIGAS DE ENSAYO**

**ZONA A****Mediciones perpendiculares a la fibra (normales)****PAR 1**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	140,90	12,20
	T <sub>2</sub>	14,00	114,80	12,20
	T <sub>3</sub>	14,00	117,50	12,20
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	104,10	11,90
	T <sub>2</sub>	14,00	112,70	11,90
	T <sub>3</sub>	14,00	115,20	11,90

**PAR 2**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	178,80	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	74,70	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	110,10	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	92,50	11,60
	T <sub>2</sub>	14,00	75,50	11,60
	T <sub>3</sub>	14,00	112,80	11,60

**PAR 3**

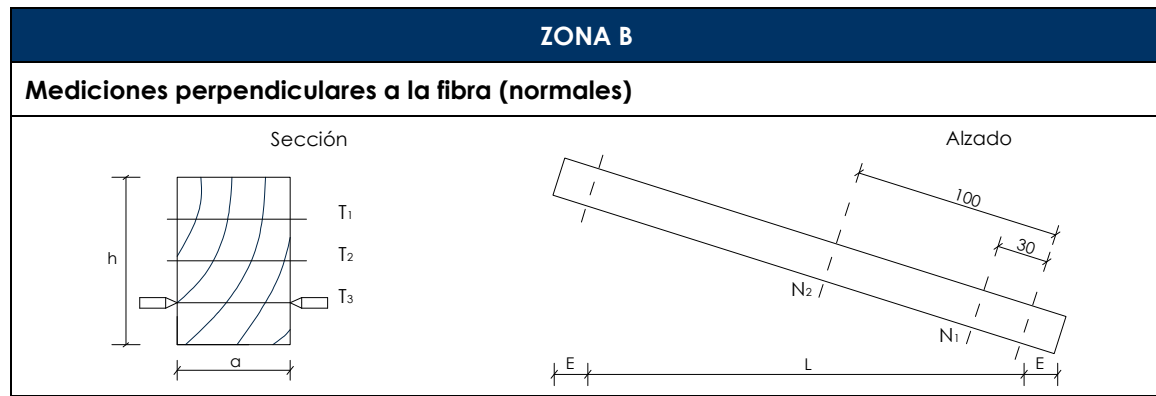
Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	105,20	12,00
	T <sub>2</sub>	14,00	124,80	12,00
	T <sub>3</sub>	14,00	236,80	12,00
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	192,80	12,30
	T <sub>2</sub>	14,00	151,70	12,30
	T <sub>3</sub>	14,00	118,70	12,30

**PAR 4**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	296,80	12,20
	T <sub>2</sub>	14,00	96,60	12,20
	T <sub>3</sub>	14,00	113,80	12,20
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	108,90	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	101,50	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	99,10	12,10

**PAR 5**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	154,90	12,50
	T <sub>2</sub>	14,00	88,90	12,50
	T <sub>3</sub>	14,00	87,80	12,50
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	122,00	12,20
	T <sub>2</sub>	14,00	110,70	12,20
	T <sub>3</sub>	14,00	113,00	12,20



PAR 1				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	76,00	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	115,80	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	120,40	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	129,00	11,90
	T <sub>2</sub>	14,00	104,00	11,90
	T <sub>3</sub>	14,00	116,40	11,90

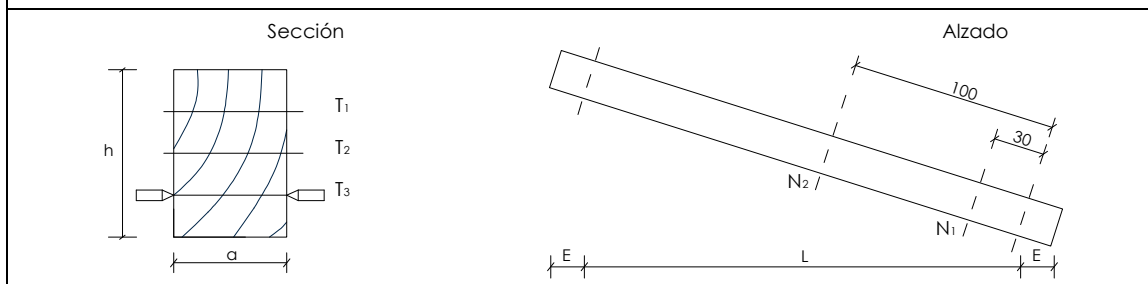
PAR 2				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	77,00	12,30
	T <sub>2</sub>	14,00	120,00	12,30
	T <sub>3</sub>	14,00	220,00	12,30
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	126,20	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	112,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	125,00	11,50

PAR 3				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	137,60	12,20
	T <sub>2</sub>	14,00	150,70	12,20
	T <sub>3</sub>	14,00	130,80	12,20
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	239,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	282,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	109,00	11,50

PAR 4				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	102,10	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	84,80	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	107,80	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	91,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	106,70	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	107,70	11,50

PAR 5				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	107,10	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	119,80	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	149,40	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	288,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	233,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	99,70	11,50



**ZONA C****Mediciones perpendiculares a la fibra (normales)****PAR 1**

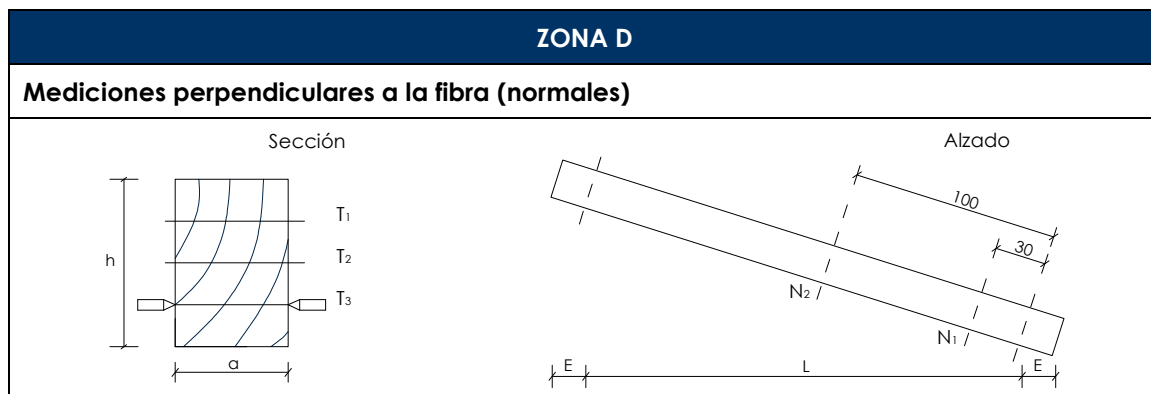
Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	220,00	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	145,00	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	190,00	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	206,00	11,90
	T <sub>2</sub>	14,00	142,00	11,90
	T <sub>3</sub>	14,00	198,00	11,90

**PAR 2**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	120,00	12,30
	T <sub>2</sub>	14,00	106,00	12,30
	T <sub>3</sub>	14,00	106,00	12,30
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	99,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	119,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	107,00	11,50

**PAR 3**

Sección	Altura	Separación, $a$ (cm)	Tiempo ( $\mu s$ )	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	142,00	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	131,00	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	122,00	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	153,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	113,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	104,00	11,50



PAR 1				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	150,00	12,30
	T <sub>2</sub>	14,00	72,00	12,30
	T <sub>3</sub>	14,00	86,00	12,30
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	290,00	11,90
	T <sub>2</sub>	14,00	75,00	11,90
	T <sub>3</sub>	14,00	87,00	11,90

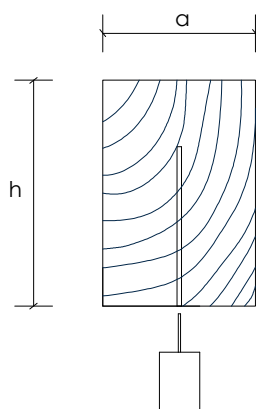
PAR 2				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	104,00	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	125,00	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	121,00	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	160,00	11,50
	T <sub>2</sub>	14,00	122,00	11,50
	T <sub>3</sub>	14,00	110,00	11,50

PAR 3				
Sección	Altura	Separación, a (cm)	Tiempo (μs)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	102,00	12,10
	T <sub>2</sub>	14,00	107,00	12,10
	T <sub>3</sub>	14,00	205,00	12,10
N <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	14,00	99,20	11,70
	T <sub>2</sub>	14,00	112,10	11,70
	T <sub>3</sub>	14,00	163,00	11,70



**C.3.2.2.3 Ensayos de resistógrafo**

Debido al tamaño del equipo de resistografía y al escaso interese existente entre los pares resultó inviable realizar mediciones en los empotramientos y desde la sección lateral de los pares. Con todo ello, el único acceso factible fue desde la zona inferior de los pares.



**Figura C.15.** Procedimiento de realización de los ensayos de resistógrafo.

Estas dificultades sobre la aplicación del resistógrafo ya han sido enunciadas por otros autores. El Capítulo III (Estado del Conocimiento) recoge algunas de ellas (6).

De cada ensayo realizado con el resistógrafo se obtiene un perfil resistográfico (Capítulo VI.3.). El análisis de dicho perfil resistográfico proporciona un valor RM (medida de resistógrafo) en Bits calculado mediante la siguiente expresión:

$$RM = \frac{\int_0^l \text{Área}}{l}$$

siendo;

$\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevados a la segunda potencia, mm<sup>2</sup>.  
 $l$  Longitud total penetrada en milímetros, mm.

Según los estudios realizados en el presente trabajo de investigación el perfil resistográfico puede aportar la siguiente información:

Sobre madera sana: Estimación sobre la densidad del material.  
 Sobre madera deteriorada: Localización exacta del deterioro y del nivel del mismo.

A continuación se muestran los resultados de las mediciones resistográficas, RM, en Bits.

ZONA A		
PAR N°	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)
1	--	11,20
2	--	--
3	--	9,35
4	--	--
5	--	13,15

ZONA B		
PAR N°	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)
1	--	--
2	--	11,17
3	--	12,13
4	--	--
5	--	12,28

ZONA C		
PAR N°	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)
1	--	10,81
2	--	--
3	--	--

ZONA D		
PAR N°	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)
1	--	11,89
2	--	--
3	--	15,42

#### C.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO

##### C.4.1. INSPECCIÓN VISUAL

En la inspección visual se determina que se trata de una cubierta a un agua formada por pares de 4,5 m de longitud con un apoyo intermedio soportado por jabalcones situados a 1,5 m del apoyo. La escuadría de los pares es 14x28 cm con un intereje de 45 cm.

Referido a la madera de la estructura, se trata de una madera de coníferas (posiblemente *Pinus Sylvestris* L o *Pinus Nigra* Arnold\*) de buena calidad. En general, es una madera con pocos nudos y, los existentes tienen un diámetro pequeño en relación a la escuadría de las piezas. En cuanto a la presencia de otros defectos hay que reseñar la presencia de fendas de secado, algunas de ellas con una longitud, profundidad y aperturas considerables. Este tipo de fendas son propias de las piezas de gran escuadría.

Es relevante el aspecto blanquecino de toda la madera de la estructura acompañado, al mismo tiempo, de una pelusa superficial. Este aspecto de la madera está relacionado con la humedad ambiente del espacio. En el caso de esta nave se trata de un espacio bajo cubierta abierto al exterior.

En cuanto al deterioro producido por agentes xilófagos se detecta la presencia de un ataque de carcoma común generalizado aunque no muy intenso con galerías de 2 mm de diámetro. Asimismo en algunos de los empotramientos de los pares en los muros se localizan deterioros por hongos de pudrición parda. Este tipo de pudrición va asociada a contenidos de humedad elevados como en el caso de los empotramientos.

\* La documentación consultada revela que se trata de una madera de pino laricio (*Pinus Nigra* Arnold).

#### **C.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): TERMOGRAFÍA, XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA**

Los ensayos realizados aportan los siguientes resultados.

##### **C.4.2.1. Ensayos de termografía**

Los ensayos realizados con termografía han permitido localizar, fundamentalmente, zonas con elevados contenidos de humedad.

El termograma 1 (Figura C.12) muestra una termografía en la que se aprecia la estructura de pares y ladrillos de la cubierta. En este termograma se aprecia como los ladrillos presentan una menor temperatura que los pares. Teniendo en cuenta la hora de la termografía (13 horas), en la que se está produciendo el calentamiento natural del faldón, el ladrillo, de menor espesor y además mayor conductividad térmica de la madera, debía haber presentado una mayor temperatura que los pares. Este hecho se explica por la presencia de humedad generalizada en el ladrillo que hace aumentar su calor específico y, por tanto, el calor necesario para aumentar su temperatura.

El termograma 2 (Figura C.13) muestra una termografía donde se aprecian humedades más elevadas en algunas zonas del ladrillo.

Finalmente, el termograma 3 (Figura C.14) representa la zona de empotramientos de los pares en el muro. En estas zonas la temperatura de la madera y el muro es más baja, revelando la presencia de focos de humedad.

##### **C.4.2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad, de medición del tiempo de transmisión ultrasónico y resistografía**

Los resultados de los ensayos se recogen a continuación.

La medición del contenido de humedad en los pares ensayados tiene un valor medio de 12%. A pesar de que los pares muestran un aspecto blanquecino como resultado de la humedad ambiente, esa humedad es anterior. En el momento en el que se realizan los ensayos de medición del contenido de humedad y de tiempo de transmisión de ultrasonidos el ambiente de la zona es seco, sin haber registrado precipitaciones por un periodo superior a 8 meses.

En cuanto a los resultados de los ensayos de medición del tiempo de velocidad ultrasónica, se detectaron bajadas de velocidad importantes fundamentalmente en las secciones superiores de las piezas (las secciones denominadas  $T_1$ ), en la zona de contacto del par con la capa de cobertura exterior. Este es el caso de los pares 1, 2, 3, 4 y 5 de la zona A, 3 y 5 de la zona B, 1 y 3 de la zona C y pares 1 y 2 de la zona D. En estos pares las velocidades alcanzaron unos valores inferiores a 1200 m/s. En el resto de las secciones (alturas  $T_2$  y  $T_3$ ) de las piezas los valores alcanzados fueron, normalmente, superiores a 1200 m/s.

Según los valores de diagnóstico aportados en el presente trabajo de investigación, valores de velocidad inferiores a 1200 m/s representan pérdidas de densidad. La situación de las zonas con bajadas de velocidad se explica, por tanto, por su contacto con la capa exterior de cubrición. Estas zonas, según confirman los ensayos de termografía, son zonas de contenidos de humedad elevados que han provocado, en estos casos, la pudrición de la sección superior de los pares.

A continuación se recogen los resultados obtenidos. En todos los casos, se aporta el valor de velocidad normal ( $V_N$ ) de la sección según su altura ( $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ). Así, para valores de velocidad inferiores a 1200 m/s se aporta la pérdida de densidad estimada (según las correlaciones establecidas en el presente trabajo). Para las secciones con valores de velocidad normal superiores a 1200 m/s, se aporta un valor de velocidad longitudinal

estimado ( $V_L$ ). A partir de este valor y según las regresiones desarrolladas, se realiza una estimación de las propiedades mecánicas de las piezas, resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE).

La asignación de una clase resistente a cada elemento según sus propiedades resistentes permite atribuir, según la resistencia a flexión de las piezas una clase resistente al conjunto C30 (7). Este valor se aproxima al valor proporcionado por la norma de clasificación visual UNE 56544 (8) para la calidad ME-1 de la especie *Pinus Nigra* Arnold. Esta norma establece para esta especie y calidad una clase resistente C27. Así, dado que en el presente trabajo no se ha realizado una clasificación visual estricta y debido a la presencia de algunos pares con mayor contenido de defectos, es correcto aplicar la clase resistente equivalente a la calidad ME-2, es decir, una clase resistente C18, encontrándonos de este modo del lado de la seguridad.

En cuanto al valor de la clase resistente asignado según el módulo de elasticidad, los resultados son más heterogéneos. Se encuentran piezas a las que es posible asignar una clase resistente C14 y otras a las que es posible asignar clases resistentes muy elevadas como C45.

Finalmente, la estimación de los valores de densidad mediante resistógrafo aporta resultados comprendidos entre 400 y 560 Kg/m<sup>3</sup>. Si tenemos en consideración el valor medio de estos resultados, 480 Kg/m<sup>3</sup>, es posible asignar una clase resistente C35. Asimismo, según los resultados de la validación de las expresiones obtenidas mediante resistógrafo (mediante las cuales se estima los valores de densidad) recogidos en el Capítulo VI.3.1.3., el valor de densidad proporcionado por el resistógrafo es inferior a la densidad real, con un error absoluto medio de 83 Kg/m<sup>3</sup>. Esto significa que el valor real de densidad de las piezas ensayadas es superior, con lo que la clase resistente asignable sería aun superior (9). No obstante, según lo recogido en los resultados del Capítulo VI.2.1.1.1. la densidad no limita la calidad de una población pues, según los valores de densidad sería posible aplicar clases resistentes superiores a las correspondientes al resto de propiedades mecánicas.

## ZONA A

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS							
PAR / SECCIÓN		ALTURA	V <sub>N,12</sub> (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	V <sub>L,12</sub> ESTIMADA (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN / CORRECCIÓN POR TAMAÑO MUESTRA <sup>1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	T <sub>1</sub>	1063,27	11,15	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1325,31	--	3468,99	55,15 / 33,09	5076,67
		T <sub>3</sub>	1292,80	--			
	2	T <sub>1</sub>	1461,14	--	3634,09	56,40 / 33,84	5794,0971
		T <sub>2</sub>	1342,10	--			
		T <sub>3</sub>	1310,83	--			
2	1	T <sub>1</sub>	815,76	20,95	--	--	--
		T <sub>2</sub>	2081,51	--	4589,82	63,66 / 38,19	9947,13
		T <sub>3</sub>	1382,51	--			
	2	T <sub>1</sub>	1647,21	--	4435,20	62,49 / 37,49	9275,25
		T <sub>2</sub>	2042,53	--			
		T <sub>3</sub>	1331,25	--			
3	1	T <sub>1</sub>	1448,02	--	3516,02	55,50 / 33,30	5281,01
		T <sub>2</sub>	1205,58	--	--	--	--
		T <sub>3</sub>	590,11	29,88			
	2	T <sub>1</sub>	756,19	23,31	--	--	--
		T <sub>2</sub>	984,40	14,27	--	--	--
		T <sub>3</sub>	1282,02	--	3397,35	54,60 / 32,76	4765,35
4	1	T <sub>1</sub>	457,84	35,12	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1591,83	--	3881,68	58,28 / 34,96	6869,95
		T <sub>3</sub>	1337,74	--			
	2	T <sub>1</sub>	1398,76	--	3933,02	58,67 / 35,20	7093,06
		T <sub>2</sub>	1507,49	--			
		T <sub>3</sub>	1546,23	--			
5	1	T <sub>1</sub>	968,66	14,89	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1747,02	--	4659,91	64,20 / 38,52	10251,71
		T <sub>3</sub>	1769,90	--			
	2	T <sub>1</sub>	1241,82	--	3504,50	55,42 / 33,25	5230,96
		T <sub>2</sub>	1377,70	--			
		T <sub>3</sub>	1347,84	--			

ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
PAR SECCIÓN		ALTURA	RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA 1 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA 2 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA 3 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m <sup>3</sup> )
1	2	--	11,20	439,08	485,13	461,51	461,91
3	2	--	9,35	405,69	439,74	409,49	418,31
5	2	--	13,15	474,26	532,98	516,34	507,86

<sup>1</sup> La norma UNE 384:2010 (7) establece que el valor del 5º percentil de la resistencia a flexión debe corregirse en función el tamaño de la muestra. En este caso debido al escaso número de piezas ensayadas establecemos la máxima penalización minorando la resistencia a flexión por el factor **0,6**.

ZONA B

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS							
PAR SECCIÓN	ALTURA		$V_{N,12}$ (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	$V_{L,12}$ ESTIMADA (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN / CORRECCIÓN POR TAMAÑO MUESTRA (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	T <sub>1</sub>	2044,33	--	4072,65	59,73 / 35,83	7699,80
		T <sub>2</sub>	1309,90	--			
		T <sub>3</sub>	1256,32	--			
	2	T <sub>1</sub>	1160,02	--	3461,73	55,09 / 33,05	5045,14
		T <sub>2</sub>	1462,64	--			
		T <sub>3</sub>	1296,29	--			
2	1	T <sub>1</sub>	2022,96	--	4359,462	61,91 / 37,14	8946,10
		T <sub>2</sub>	1267,20	--			
		T <sub>3</sub>	652,05	27,43	--	--	--
	2	T <sub>1</sub>	1175,19	--	3269,29	53,63 / 32,17	4208,89
		T <sub>2</sub>	1338,35	--			
		T <sub>3</sub>	1187,55	--			
3	1	T <sub>1</sub>	1090,91	10,05	--	--	--
		T <sub>2</sub>	988,31	14,11	--	--	--
		T <sub>3</sub>	1152,27	7,62	--	--	--
	2	T <sub>1</sub>	567,84	30,77	--	--	--
		T <sub>2</sub>	464,23	34,87	--	--	--
		T <sub>3</sub>	1378,25	--	3652,36	56,54 / 33,92	5873,47
4	1	T <sub>1</sub>	1498,08	--	4182,26	60,57 / 36,34	8176,11
		T <sub>2</sub>	1822,58	--			
		T <sub>3</sub>	1413,98	--			
	2	T <sub>1</sub>	1672,96	--	3956,95	58,85 / 35,31	7197,04
		T <sub>2</sub>	1410,37	--			
		T <sub>3</sub>	1396,24	--			
5	1	T <sub>1</sub>	1423,82	--	3560,14	55,84 / 33,50	5472,74
		T <sub>2</sub>	1263,08	--			
		T <sub>3</sub>	994,50	13,87	--	--	--
	2	T <sub>1</sub>	452,23	35,34	--	--	--
		T <sub>2</sub>	585,34	30,07	--	--	--
		T <sub>3</sub>	1517,23	--	4020,66	59,34 / 35,60	7473,87

ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
PAR SECCIÓN	ALTURA		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m <sup>3</sup> )
2	2	--	11,17	438,53	484,40	460,67	461,20
3	2	--	12,13	455,86	507,95	487,66	483,82
5	2	--	12,28	458,56	511,63	491,88	487,36

## ZONA C

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS							
PAR SECCIÓN		ALTURA	$V_{N,12}$ (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	$V_{L,12}$ ESTIMADA (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN / CORRECCIÓN POR TAMAÑO MUESTRA (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	T <sub>1</sub>	645,67	27,68	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1027,49	12,56	--	--	--
		T <sub>3</sub>	762,22	23,07	--	--	--
	2	T <sub>1</sub>	689,45	25,95	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1044,77	11,88	--	--	--
		T <sub>3</sub>	721,31	24,69	--	--	--
2	1	T <sub>1</sub>	1267,20	--	3673,85	56,70 / 34,02	5966,86
		T <sub>2</sub>	1445,94	--			
		T <sub>3</sub>	1445,94	--			
	2	T <sub>1</sub>	1528,75	--	3699,31	56,90 / 34,14	6077,48
		T <sub>2</sub>	1253,05	--			
		T <sub>3</sub>	1406,10	--			
3	1	T <sub>1</sub>	1051,15	11,63	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1147,18	7,82	--	--	--
		T <sub>3</sub>	1238,63	--	3282,37	53,73 / 32,23	4265,70
	2	T <sub>1</sub>	949,78	15,64	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1325,51	--	3677,39	56,73 / 34,03	5982,23
		T <sub>3</sub>	1449,88	--			

ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
PAR SECCIÓN		ALTURA	RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m <sup>3</sup> )
1	2	--	10,81	432,04	475,56	450,54	452,72
2	2	--	--	--	--	--	--
3	2	--	--	--	--	--	--

## ZONA D

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS							
PAR SECCIÓN	ALTURA		$V_{N,12}$ (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	$V_{L,12}$ ESTIMADA (m/s)	RESISTENCIA A FLEXIÓN / CORRECCIÓN POR TAMAÑO MUESTRA (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )
1	1	T <sub>1</sub>	996,53	13,79	--	--	--
		T <sub>2</sub>	2169,42	--	5262,44	68,78 / 41,26	12869,94
		T <sub>3</sub>	1802,24	--			
	2	T <sub>1</sub>	461,11	35,00	--	--	--
		T <sub>2</sub>	2066,44	--	5080,32	67,39 / 40,43	12078,55
		T <sub>3</sub>	1767,77	--			
2	1	T <sub>1</sub>	1469,02	--			
		T <sub>2</sub>	1206,69	--	3467,38	55,13 / 33,07	5069,66
		T <sub>3</sub>	1249,63	--			
	2	T <sub>1</sub>	903,35	17,48	--	--	--
		T <sub>2</sub>	1219,49	--	3424,06	54,80 / 32,88	4881,43
		T <sub>3</sub>	1364,71	--			
3	1	T <sub>1</sub>	1499,64	--	3875,46	58,23 / 34,93	6842,94
		T <sub>2</sub>	1425,24	--			
		T <sub>3</sub>	699,68	25,55	--	--	--
	2	T <sub>1</sub>	1531,82	--	3809,70	57,73 / 34,63	6557,19
		T <sub>2</sub>	1343,43	--			
		T <sub>3</sub>	891,04	17,97	--	--	--

ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
PAR SECCIÓN	ALTURA		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m <sup>3</sup> )
1	2	--	11,89	451,53	502,06	480,91	478,17
2	2	--					
3	2	--	15,42	515,23	588,67	580,16	561,35



## C.5. CONCLUSIONES

Este estudio se centra en la inspección y diagnóstico de la cubierta de un edificio declarado Bien de Interés Cultural (B.I.C.), la Iglesia de Ntra. Sra. de la Granada de Moguer. Dentro de este edificio se estudia la cubierta de madera de una de las naves laterales de la Iglesia, datada de la época de construcción del edificio original tras el terremoto de Lisboa de 1755. Para ello se realiza una inspección visual y una campaña de ensayos in situ empleando técnicas no destructivas como los ultrasonidos, la termografía o la resistografía. Todas estas herramientas nos han permitido realizar un diagnóstico preciso. El uso de estas técnicas nos permite concluir:

- A partir de la inspección mediante termografía de infrarrojos se ha aportado información sobre zonas con distinto contenido de humedad y que, por tanto, pudieran presentar, en el momento de la inspección o en un futuro, signos de pudrición. También ha sido posible distinguir la estructura de la cubierta de pares de madera y ladrillo por tabla.
- Para obtener datos más precisos sobre la capacidad resistente de la madera o sobre la pérdida de densidad por pudrición o ataque de xilófagos en el interior ha sido necesario recurrir al uso de una técnica complementaria, los ultrasonidos. Los ultrasonidos se presentan como una técnica eficaz para establecer un diagnóstico sobre el estado de conservación de una estructura de madera permitiendo estimar su clase resistente y/o su grado de deterioro, si existiera.
- Los ensayos de ultrasonidos realizados sobre los pares permiten asignar, según los valores de resistencia estimados a través de las regresiones desarrolladas en el presente trabajo, clases resistentes superiores a C30. Esta clase resistente es ligeramente superior al valor asignado por la norma de clasificación visual UNE 56544 para la calidad ME-1 de la especie *Pinus Nigra* Arnold, C27. No obstante, a pesar de que la calidad general de la madera empleada es buena, en el presente trabajo no se ha realizado una clasificación visual estricta y, debido a la presencia de algunos pares con mayor contenido de defectos, es recomendable aplicar la clase resistente equivalente a la calidad ME-2, es decir, una clase resistente C18. Asimismo, los resultados derivados de la estimación del módulo de elasticidad según los ensayos de ultrasonidos son más heterogéneos aportando clases resistentes que varían desde C14 a C45. Finalmente, la clase resistente asignada según la estimación de los valores de densidad de los pares es C35. Sin embargo, en el presente trabajo se ha determinado que el valor de la densidad de una madera es siempre superior al valor establecido por la clase resistente correspondiente, por lo que la densidad no limita la calidad de una población.

Ante la necesidad de un recálculo de la estructura se puede aportar con bastante seguridad el uso de una clase resistente C18 para la determinación de los parámetros de cálculo.

- Aunque el uso de técnicas no destructivas puede ser muy útil en la evaluación del estado de conservación de una estructura de madera, estas técnicas no pueden sustituir a la investigación inicial basado en el análisis visual. Ambos pueden complementarse entre sí en la obtención de información fiable tanto como sea posible para cualquier proyecto de restauración o conservación.
- Por último, el uso de estas técnicas de diagnóstico implica un planteamiento sostenible posibilitando sustituir exclusivamente elementos dañados y aprovechar las posibilidades resistentes de la madera ante posibles incrementos de carga o cambios de uso.

## Referencias

- (1) Falcón Márquez, T. Arte hispalense. Pedro de Silva. Arquitecto Andaluz del Siglo XVIII. Sevilla 1979.
- (2) Ludwig, N, Redaelli, V, Rosina, E, Augelli, F. Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. Infrared Physics & Technology Vol. 46. (2004), pp. 161-166.
- (3) Tanaka, T. "Wood inspection by thermography". 12th International Symposium on non-destructive testing of wood. Wood NTD-2000 Vol. I6, nº 03 (2001).
- (4) Rodríguez Liñán C. Rubio de Hita P. "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos". Universidad de Sevilla Secretariado de Publicaciones, 2000.
- (5) ISO 3443-7:1988. Tolerancias por construir. Parte 7: Principios generales para criterios de aprobación, control de conformidad con datos específicos de tolerancia dimensionales y control estadístico. Método 2 (método de control Estadístico).
- (6) Tannert T. Drill resistance. In Assessment of timber structures. COST E 55 report. Ed. Phillip Dietsch and Jochen Köhler, Shaker Verlag.
- (7) UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- (8) UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural-Maderas de coníferas.
- (9) UNE-EN 338:2010. Madera estructural. Clases resistentes.

## **ANEJO-D**

**INSPECCIÓN DE UN FORJADO DE  
ENTREVIGADO CUAJADO DE UN  
EDIFICIO RESIDENCIAL (SEVILLA)**

En este anejo se desarrolla el estudio de un forjado de entrevigado cuajado perteneciente a un edificio residencial del siglo XVIII. Este estudio se acomete en varias etapas:

1. Estudio de la planimetría del edificio. Localización de la zona de estudio.
2. Inspección in situ.
  - Fase 1: Inspección visual.
  - Fase 2: Realización de ensayos no destructivos (END):
    - Xilohigrómetro
    - Ultrasonidos
3. Ensayos de laboratorio. Tras desmontar las vigas del forjado se realizan análisis de resistografía.
4. Análisis de los datos obtenidos.
5. Diagnóstico.

D.1. DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

El edificio de estudio está situado en el centro histórico de Sevilla, en la calle Lineros nº 11. Se trata de un edificio de viviendas entre medianeras del siglo XVIII que consta de cuatro plantas de altura (PB+III) y tres crujas. La planta baja está ocupada por un local comercial. Tanto la caja de escaleras como el patio se encuentran en la segunda cruja.

Su sistema constructivo está formado por muros de carga de fábrica de ladrillo y forjados de madera. En planta baja los muros interiores se sustituyen por pilares de fundición para liberar espacio dentro del local comercial. En cuanto a los forjados, se observan distintas tipologías: en la primera cruja de planta baja y primera el forjado es de entrevigado cuajado, mientras que en las plantas segunda y tercera son tableros de madera. Asimismo, se han localizado algunas sustituciones puntuales de estos forjados por forjados metálicos.

A continuación se representa gráficamente la planimetría del edificio.



Figura D.1. Planimetría del edificio.

## D.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. EL FORJADO DE MADERA DE PLANTA BAJA

Como se especifica en la descripción del edificio, los forjados se resuelven mediante distintas tipologías constructivas empleando, en todos los casos, una estructura portante de madera.

Este anejo se centra en los trabajos de inspección y diagnóstico del forjado de la primera crujía de planta baja. Se trata de un forjado de entrevigado cuajado resuelto mediante vigas de una escuadría de 12,5 x 17,8 cm y un intereje de 50 cm.

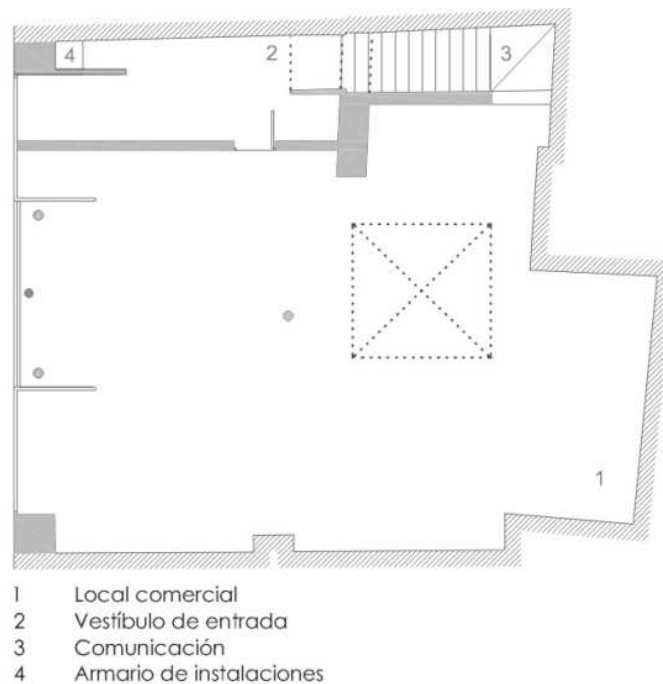


Figura D.2. Localización de la zona de estudio.

## D.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En el momento de realizar el presente estudio el edificio se encontraba en fase de demolición. El objetivo, por tanto, de los trabajos de inspección y diagnóstico fue realizar una aplicación práctica de los avances desarrollados en el presente trabajo de investigación.

Con todo ello, la metodología de estudio fue desarrollada en varias etapas:

1. Inspección visual. A partir de la inspección visual es posible determinar la especie de madera y las posibles alteraciones causadas por ataques biológicos o contenidos de humedad elevados.
2. Realización de ensayos destructivos: xilohigrómetro y ultrasonidos. A partir de los ensayos no destructivos es posible determinar las características mecánicas de la madera y la extensión de los daños.
3. Realización de ensayos en laboratorio: resistografía. Los ensayos de resistografía permiten localizar la zona deteriorada dentro de una sección y la pérdida de densidad que se produce. Asimismo, en las secciones sanas permite estimar un valor de densidad aproximado de la madera.

### D.3.1. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual se realiza en el momento de la demolición del edificio. Esta situación dificulta la visión sobre el forjado que además de sucio, como el resto del edificio, se encontraba apuntalado.

En la inspección visual se detecta que el forjado está pintado. Este hecho dificulta la inspección y merma en gran medida los resultados que pudieran obtenerse. Asimismo, esta situación junto con la morfología de este tipo de forjados, en la que se ocultan las caras laterales de las piezas, impiden que se lleve a cabo una clasificación visual de las piezas conforme a la normativa de clasificación visual UNE 56544:2007.

A pesar de estos inconvenientes, puede apreciarse como, aparentemente, el estado de conservación de la madera exterior es bueno aunque se encuentran restos de cañas que podrían haber sujetado un falso techo anterior. Asimismo, se aprecian muchos elementos metálicos (puntillas) clavadas sobre la madera de las vigas.



**Figura D.3.** Forjado de inspección pintado y con restos de cañas de sujeción del falso techo (I).



**D.4.** Forjado de inspección pintado y con restos de cañas de sujeción del falso techo (II).

Las conclusiones extraídas de esta inspección no contribuyen a establecer un diagnóstico fiable. Es por ello que las labores de diagnóstico se confían en gran medida a los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos realizados en la fase posterior.

### **D.3.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS. TOMA DE DATOS**

Se realizan ensayos de determinación de contenido de humedad y medición de las velocidades de transmisión ultrasónicas.

El número de vigas a ensayar en el forjado se determina según lo establecido en el Plan de Muestreo Estadístico contenido en la norma ISO 3443-7:1988.

Según la norma ISO 3443-7:1988 debe elegirse uno de los tres Niveles de Confianza Aceptables (NCA) entre 4, 6,5 y 10 %. La elección de un NCA se realiza en función de la fiabilidad que se precise en la aplicación de los resultados obtenidos. A medida que reducimos el NCA, aumenta la fiabilidad de la inspección y la posibilidad de que aparezca un valor diferente es menor.

El forjado que nos ocupa en esta inspección está compuesto por 12 vigas de madera. De este modo, para un Nivel de Confianza Aceptable (NCA) del 4%, el tamaño de la muestra a estudiar viene determinada por una única familia de 3 elementos. No obstante, para aumentar la fiabilidad de la inspección aumentamos el número de elementos a ensayar hasta un total de 5.

La inspección se realiza mediante la metodología desarrollada en el Capítulo VI.4. A continuación, se presentan las fichas de la inspección desarrollada in situ.

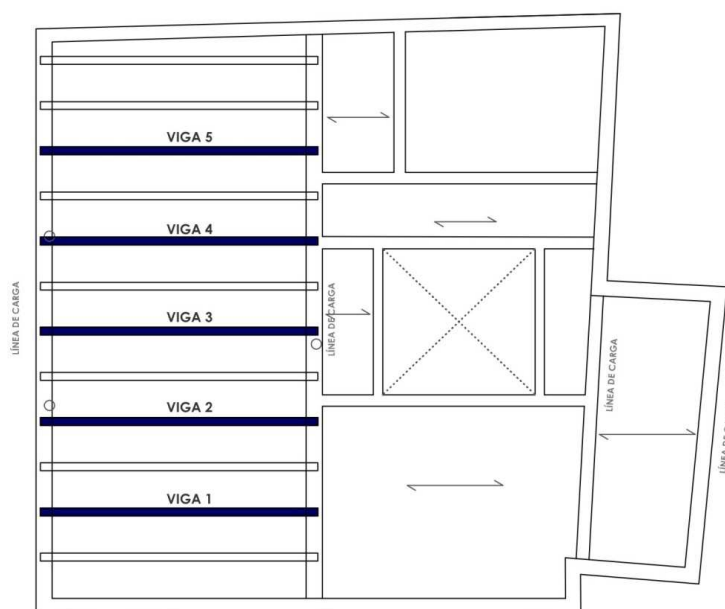


## INSPECCIÓN DEL FORJADO DE ENTREVIGADO CUAJADO

## CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL FORJADO

Luz de las vigas (m)	4,00	Entrevigado (m)	0,50
	Escuadría (cm)	Inferior, a (cm)	12,50
		Altura base, $h_{base}$ (cm)	4,00
		Altura estimada, $h_{est}$ (cm)	18,00

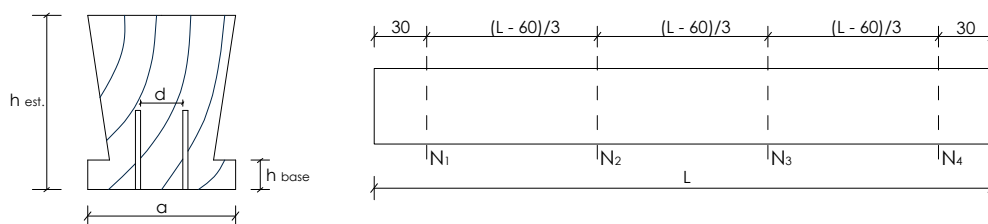
## LOCALIZACIÓN DE LAS VIGAS DE INSPECCIÓN



## MÉTODO DE INSPECCIÓN APLICABLE

Separación libre máxima entre palpadores en cm, $d = (a - 7,20)$ :	5,30
Resistógrafo	
Ultrasonidos	X

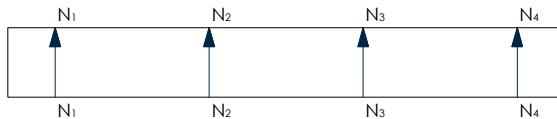
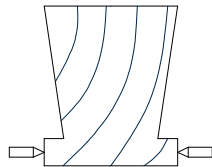
## ELECCIÓN DE LAS SECCIONES DE ENSAYO EN LAS VIGAS



## VIGA 1

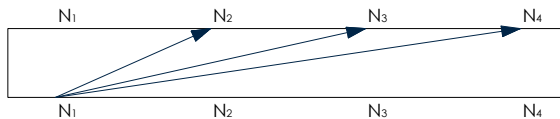
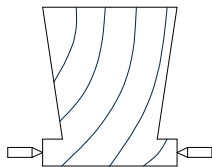
## MEDICIONES EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)



Sección	Separación(a)(cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	12,50	138,80	9,20
N <sub>2</sub>	12,50	136,01	9,20
N <sub>3</sub>	12,50	162,00	9,10
N <sub>4</sub>	12,50	166,41	8,90

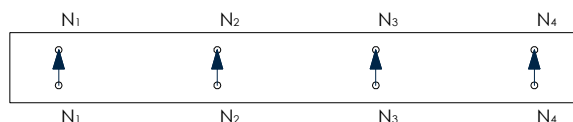
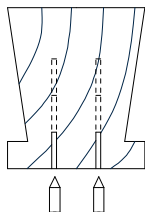
## Longitudinales cruzadas



Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>	1,10 / 6,48°	271,41	9,20 / 9,20
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>	2,20 / 3,25°	533,52	9,20 / 9,10
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>	3,30 / 2,16°	1233,76	9,20 / 8,90

## MEDICIONES INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

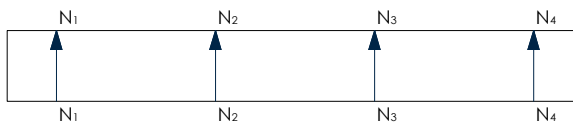
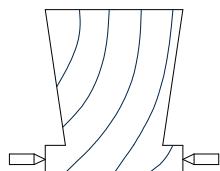


Sección	Prof. (cm)	Separación (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	6	5,30	88,68	9,20
N <sub>1</sub>	9	5,30	86,74	9,20
N <sub>1</sub>	15	5,30	109,49	9,20
N <sub>2</sub>	6	5,30	84,86	9,20
N <sub>2</sub>	9	5,30	89,32	9,20
N <sub>2</sub>	15	5,30	91,32	9,20
N <sub>3</sub>	6	5,30	87,10	9,10
N <sub>3</sub>	9	5,30	91,85	9,10
N <sub>3</sub>	15	5,30	102,72	9,10
N <sub>4</sub>	6	5,30	115,36	8,90
N <sub>4</sub>	9	5,30	84,17	8,90
N <sub>4</sub>	15	5,30	89,08	8,90

## VIGA 2

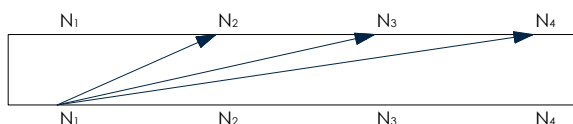
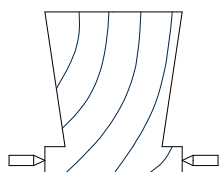
## MEDICIONES EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)



Sección	Separación(a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	12,50	122,71	9,30
N <sub>2</sub>	12,50	154,70	7,60
N <sub>3</sub>	12,50	154,70	9,80
N <sub>4</sub>	12,50	121,60	8,40

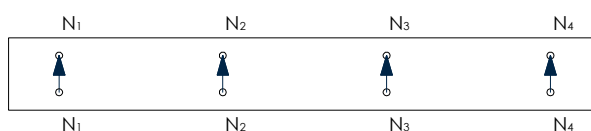
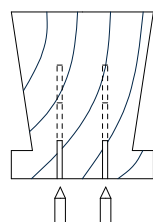
## Longitudinales cruzadas



Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>	1,10 / 6,48°	213,84	9,30 / 7,60
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>	2,20 / 3,25°	675,84	9,30 / 9,80
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>	3,30 / 2,16°	1130,25	9,30 / 8,40

## MEDICIONES INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

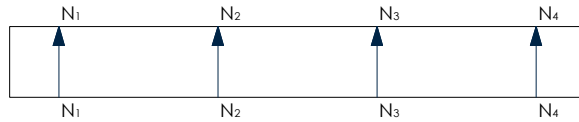
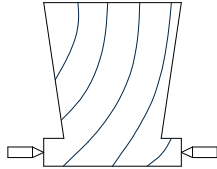


Sección	Prof. (cm)	Separación (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	6	5,30	121,49	9,30
N <sub>1</sub>	9	5,30	129,84	9,30
N <sub>1</sub>	15	5,30	141,13	9,30
N <sub>2</sub>	6	5,30	99,04	8,90
N <sub>2</sub>	9	5,30	95,60	8,90
N <sub>2</sub>	15	5,30	177,02	8,90
N <sub>3</sub>	6	5,30	83,74	9,80
N <sub>3</sub>	9	5,30	94,54	9,80
N <sub>3</sub>	15	5,30	137,31	9,80
N <sub>4</sub>	6	5,30	81,88	8,40
N <sub>4</sub>	9	5,30	91,31	8,40
N <sub>4</sub>	15	5,30	91,64	8,40

## VIGA 3

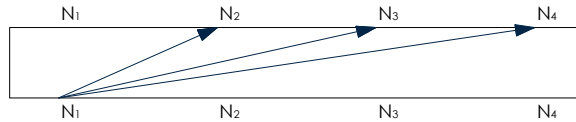
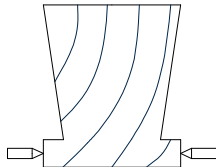
## MEDICIONES EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)



Sección	Separación(a)(cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	12,50	125,30	11,00
N <sub>2</sub>	12,50	159,90	11,80
N <sub>3</sub>	12,50	125,01	10,60
N <sub>4</sub>	12,50	150,01	10,10

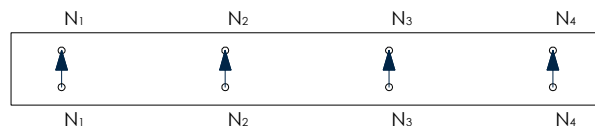
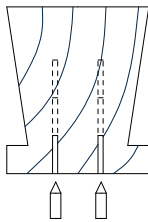
## Longitudinales cruzadas



Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>	1,10 / 6,48°	223,04	11,00 / 11,80
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>	2,20 / 3,25°	716,23	11,00 / 10,60
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>	3,30 / 2,16°	735,55	11,00 / 10,10

## MEDICIONES INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

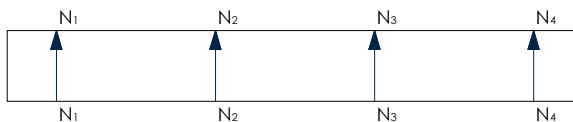
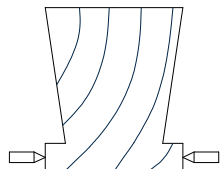


Sección	Prof. (cm)	Separación (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	6	5,30	116,79	11,00
N <sub>1</sub>	9	5,30	137,61	11,00
N <sub>1</sub>	15	5,30	--	11,00
N <sub>2</sub>	6	5,30	86,92	11,80
N <sub>2</sub>	9	5,30	95,07	11,80
N <sub>2</sub>	15	5,30	156,93	11,80
N <sub>3</sub>	6	5,30	86,18	10,60
N <sub>3</sub>	9	5,30	93,85	10,60
N <sub>3</sub>	15	5,30	119,64	10,60
N <sub>4</sub>	6	5,30	111,09	10,10
N <sub>4</sub>	9	5,30	116,51	10,10
N <sub>4</sub>	15	5,30	134,87	10,10

## VIGA 4

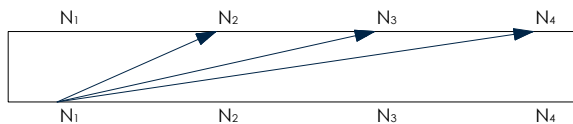
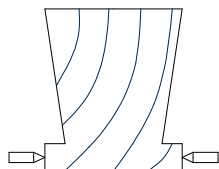
## MEDICIONES EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)



Sección	Separación(a) (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	12,50	138,60	10,10
N <sub>2</sub>	12,50	154,03	9,80
N <sub>3</sub>	12,50	152,90	7,30
N <sub>4</sub>	12,50	138,71	10,00

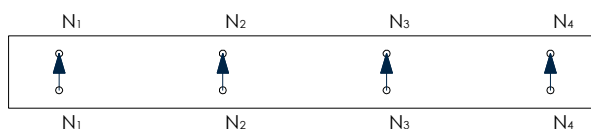
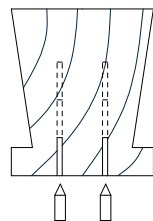
## Longitudinales cruzadas



Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>	1,10 / 6,48°	270,68	10,10 / 9,80
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>	2,20 / 3,25°	670,66	10,10 / 7,30
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>	3,30 / 2,16°	1105,14	10,10 / 10,00

## MEDICIONES INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

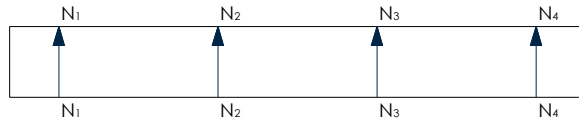
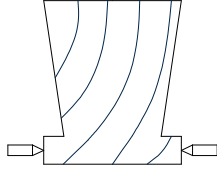


Sección	Prof. (cm)	Separación (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	6	5,30	98,52	10,10
N <sub>1</sub>	9	5,30	--	10,10
N <sub>1</sub>	15	5,30	--	10,10
N <sub>2</sub>	6	5,30	89,93	9,80
N <sub>2</sub>	9	5,30	109,68	9,80
N <sub>2</sub>	15	5,30	111,07	9,80
N <sub>3</sub>	6	5,30	93,49	7,30
N <sub>3</sub>	9	5,30	94,01	7,30
N <sub>3</sub>	15	5,30	95,46	7,30
N <sub>4</sub>	6	5,30	94,37	10,00
N <sub>4</sub>	9	5,30	103,70	10,00
N <sub>4</sub>	15	5,30	90,82	10,00

## VIGA 5

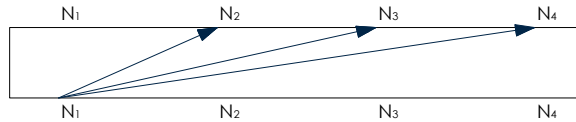
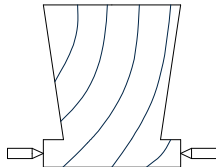
## MEDICIONES EXTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)



Sección	Separación(a)(cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	12,50	157,80	10,20
N <sub>2</sub>	12,50	143,82	8,90
N <sub>3</sub>	12,50	147,91	11,50
N <sub>4</sub>	12,50	148,70	12,80

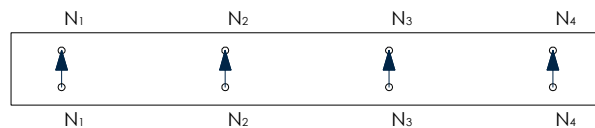
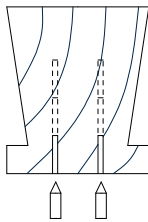
## Longitudinales cruzadas



Sección	Separación (m) / Angulo(°)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub> - N <sub>2</sub>	1,10 / 6,48°	340,69	10,20 / 8,90
N <sub>1</sub> - N <sub>3</sub>	2,20 / 3,25°	592,45	10,20 / 11,50
N <sub>1</sub> - N <sub>4</sub>	3,30 / 2,16°	1036,35	10,20 / 12,80

## MEDICIONES INTERIORES

## Perpendiculares a la fibra (normales)

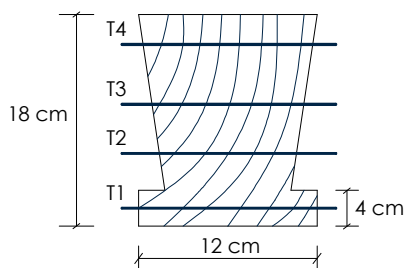


Sección	Prof. (cm)	Separación (cm)	Tiempo ( $\mu$ s)	Humedad (%)
N <sub>1</sub>	6	5,30	--	10,20
N <sub>1</sub>	9	5,30	--	10,20
N <sub>1</sub>	15	5,30	--	10,20
N <sub>2</sub>	6	5,30	89,36	8,90
N <sub>2</sub>	9	5,30	90,45	8,90
N <sub>2</sub>	15	5,30	114,64	8,90
N <sub>3</sub>	6	5,30	98,16	11,50
N <sub>3</sub>	9	5,30	98,87	11,50
N <sub>3</sub>	15	5,30	118,00	11,50
N <sub>4</sub>	6	5,30	94,81	12,80
N <sub>4</sub>	9	5,30	91,21	12,80
N <sub>4</sub>	15	5,30	109,01	12,80

### D.3.3. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Tras la demolición del forjado se decide recuperar, para su análisis en laboratorio, las vigas que fueron inspeccionadas in situ. Para efectuar dicho análisis empleamos una técnica complementaria de inspección: el resistógrafo.

En cada una de las vigas se analizan las secciones que fueron previamente estudiadas mediante ensayos de ultrasonidos. De este modo, en cada viga se seleccionan las 4 secciones de ensayo anteriores marcando las 4 alturas de ensayo (1 exterior y 3 interiores) realizadas mediante ultrasonidos. A continuación se detalla un esquema con las alturas de ensayo dentro de cada sección:



**D.5.** Selección de alturas de ensayo dentro de cada sección para análisis de resistógrafo.

Siendo las profundidades de los taladros las siguientes:

T<sub>1</sub>: 2 cm  
T<sub>2</sub>: 6 cm  
T<sub>3</sub>: 9 cm  
T<sub>4</sub>: 15 cm

De cada ensayo realizado con el resistógrafo se obtiene un perfil resistográfico (Capítulo VI.3.). El análisis de dicho perfil resistográfico nos proporciona un valor RM (medida de resistógrafo) en Bits calculado mediante la siguiente expresión:

$$RM = \frac{\int_0^I \text{Área}}{I}$$

siendo;

$\int_{\text{Área}}$  Integral que representa el área bajo la curva del perfil resistográfico en milímetros elevados a la segunda potencia, mm<sup>2</sup>.  
I Longitud total penetrada en milímetros, mm.

Según los estudios realizados en el presente trabajo de investigación el perfil resistográfico puede aportar la siguiente información:

Sobre madera sana: Estimación sobre la densidad del material.  
Sobre madera deteriorada: Localización exacta del deterioro y del nivel del mismo.

En el presente estudio, el análisis de las vigas revela que la madera que se encuentra al exterior es una madera sana. Por ello se decide estudiar separadamente los resultados obtenidos mediante resistógrafo en las secciones exteriores e interiores.

Los perfiles resistográficos de las mediciones interiores se recogen en el Anejo 12.

VIGA 1					
	Profundidad	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)	Sección 3 (RM, Bits)	Sección 4 (RM, Bits)
Sección exterior	T <sub>1</sub>	11,63	12,55	10,50	11,04
Secciones interiores	T <sub>2</sub>	10,58	13,16	11,74	10,31
	T <sub>3</sub>	10,91	10,13	12,48	9,08
	T <sub>4</sub>	10,50	11,30	11,25	9,95

VIGA 2					
	Profundidad	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)	Sección 3 (RM, Bits)	Sección 4 (RM, Bits)
Sección exterior	T <sub>1</sub>	11,81	7,16	9,79	11,50
Secciones interiores	T <sub>2</sub>	6,65	8,40	10,29	10,42
	T <sub>3</sub>	6,25	9,71	9,16	9,88
	T <sub>4</sub>	8,08	6,37	7,31	12,06

VIGA 3					
	Profundidad	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)	Sección 3 (RM, Bits)	Sección 4 (RM, Bits)
Sección exterior	T <sub>1</sub>	8,02	5,59	9,20	10,47
Secciones interiores	T <sub>2</sub>	8,04	8,07	8,14	7,55
	T <sub>3</sub>	5,69	8,42	8,26	7,03
	T <sub>4</sub>	2,83	4,46	7,70	6,68

VIGA 4					
	Profundidad	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)	Sección 3 (RM, Bits)	Sección 4 (RM, Bits)
Sección exterior	T <sub>1</sub>	11,18	11,26	12,14	11,05
Secciones interiores	T <sub>2</sub>	9,95	10,44	11,04	11,37
	T <sub>3</sub>	-	7,71	10,10	10,71
	T <sub>4</sub>	-	7,79	10,03	10,79

VIGA 5					
	Profundidad	Sección 1 (RM, Bits)	Sección 2 (RM, Bits)	Sección 3 (RM, Bits)	Sección 4 (RM, Bits)
Sección exterior	T <sub>1</sub>	11,34	10,74	11,16	11,21
Secciones interiores	T <sub>2</sub>	5,65	9,88	11,09	11,36
	T <sub>3</sub>	-	10,28	10,16	10,63
	T <sub>4</sub>	-	8,23	10,68	10,43



## D.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. DIAGNÓSTICO

### D.4.1. INSPECCIÓN VISUAL

De la inspección visual se obtiene que, aunque la madera está pintada, aparentemente su estado de conservación exterior de las vigas era sano. No obstante, dada la casuística del momento en el que se realiza la inspección su estado de abandono es notable con suciedad, restos de cañas que pudieran haber soportado algún falso techo anterior y elementos metálicos (puntillas).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la inspección visual se decide analizar separadamente los resultados de los ensayos obtenidos en las secciones interiores y exteriores de las vigas.

### D.4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END): XILOHIGRÓMETRO, ULTRASONIDOS Y RESISTOGRAFÍA

La campaña de ensayos no destructivos arroja los resultados recogidos a continuación.

Según los ensayos de determinación del contenido de humedad, en todos los casos el contenido de humedad de las vigas es bajo, con un valor medio aproximado de 9%.

En cuanto al análisis mediante ultrasonidos, para cada viga se realiza un *análisis global* y un *análisis por secciones* de los resultados obtenidos. El análisis global se realiza aportando un valor medio de velocidad longitudinal de ultrasonidos para cada pieza. Este valor es obtenido a través de las velocidades longitudinales cruzadas, medidas en el exterior de las mismas. A partir de este valor de velocidad longitudinal media es posible estimar la calidad de la madera de la pieza a partir de la determinación de su módulo de elasticidad. El análisis por secciones se realiza mediante los valores de velocidad de ultrasonidos perpendiculares a la fibra (velocidades normales). A través de estas mediciones se pretende determinar si existe algún deterioro interno en las secciones estudiadas.

Como resultado del *análisis global* de las piezas se obtiene que a partir de la estimación del módulo de elasticidad derivan clases resistentes heterogéneas pero, en todos los casos, superiores a C16. En cuanto a los valores de resistencia a flexión aportados, éstos se han obtenido mediante las regresiones desarrolladas de modo general para las piezas de pino silvestre (*Pinus Sylvestris* L). La pintura de la madera y el hecho de estar las vigas embutidas en la estructura del forjado impidieron realizar una clasificación visual de las piezas.

Como análisis general de los *resultados por secciones* es posible afirmar que en las secciones exteriores de las vigas se ratifican los resultados obtenidos en la inspección visual. Según los resultados de todas las mediciones exteriores realizadas, las vigas están sanas, al menos en su sección exterior. En todos los casos el valor de velocidad normal obtenido es superior a 1200 m/s. Este valor, según los criterios de diagnóstico aportados en el presente trabajo, corresponde con una madera sana. Por el contrario, los resultados de las mediciones interiores confirman deterioros y pérdidas de densidad internas.

Finalmente, la estimación de los valores de densidad mediante resistógrafo aporta resultados por encima de 400 Kg/m<sup>3</sup> hasta valores superiores a 500 Kg/m<sup>3</sup>. Si tenemos en consideración el valor medio de estos resultados, 450 Kg/m<sup>3</sup>, es posible asignar una clase resistente C27. Asimismo, según los resultados de la validación de las expresiones obtenidas mediante resistógrafo (mediante las cuales se estima los valores de densidad) recogidos en el Capítulo VI.3.1.3., el valor de densidad proporcionado por el resistógrafo es inferior a la densidad real, con un error absoluto medio de 83 Kg/m<sup>3</sup>. Esto significa que el valor real de densidad de las piezas ensayadas es superior con lo que la clase resistente asignable sería aun superior. No obstante, según lo recogido en los resultados del Capítulo VI.2.1.1.1. la densidad no limita la calidad de una población pues, según los valores de densidad sería posible aplicar clases resistentes superiores que las que corresponden al resto de propiedades mecánicas.

## VIGA 1

## ANÁLISIS GLOBAL

HUMEDAD MEDIA (%)	VELOCIDAD LONGITUD.12% MEDIA (m/s)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
9,10	3844,73	5877,38	28,37	C18

## ANÁLISIS POR SECCIONES

## ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

SECCIÓN		HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL <sub>12</sub> (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	
EXTERIOR	1	9,20	1789,76	--	
	2	9,20	1794,66	--	
	3	9,10	1359,77	--	
	4	8,90	1408,87	--	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	9,20	2084,72	--
		T <sub>3</sub>	9,20	2244,35	--
		T <sub>4</sub>	9,20	1163,13	7,20
	2	T <sub>2</sub>	9,20	2424,34	--
		T <sub>3</sub>	9,20	2036,38	--
		T <sub>4</sub>	9,20	1899,15	--
	3	T <sub>2</sub>	9,10	2209,91	--
		T <sub>3</sub>	9,10	1862,64	--
		T <sub>4</sub>	9,10	1360,11	--
	4	T <sub>2</sub>	8,90	2325,12	--
		T <sub>3</sub>	8,90	1907,20	--
		T <sub>4</sub>	8,90	1063,53	11,41

## ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO

SECCIÓN		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m³)	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m³)	
EXTERIOR	1	11,63	446,83	495,68	473,60	472,03	
	2	12,55	463,43	518,25	499,46	493,71	
	3	10,50	426,443	467,95	441,82	445,40	
	4	11,04	436,18	481,20	457,01	458,13	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	10,58	427,88	469,92	444,07	447,29
		T <sub>3</sub>	10,91	433,84	478,01	453,35	455,07
		T <sub>4</sub>	10,50	426,44	467,95	441,8285	445,40
	2	T <sub>2</sub>	13,16	474,44	533,22	516,61	508,09
		T <sub>3</sub>	10,13	419,76	458,87	431,42	436,69
		T <sub>4</sub>	11,30	440,87	487,58	464,32	464,26
	3	T <sub>2</sub>	11,74	448,82	498,38	476,69	474,631
		T <sub>3</sub>	12,48	462,17	516,53	497,50	492,07
		T <sub>4</sub>	11,25	439,97	486,35	462,91	463,08
	4	T <sub>2</sub>	10,31	423,01	463,29	436,48	440,93
		T <sub>3</sub>	9,95	416,51	454,46	426,36	432,44
		T <sub>4</sub>	9,08	Pérdida de densidad estimada (%)			7,30

## VIGA 2

## ANÁLISIS GLOBAL

HUMEDAD MEDIA (%)	VELOCIDAD LONGITUD.12% MEDIA (m/s)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
8,9	3992,68	6443,87	31,51	C20

## ANÁLISIS POR SECCIONES

## ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

SECCIÓN	HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL <sub>12</sub> (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)
EXTERIOR	1	9,3	1895,42
	2	7,6	1325,5
	3	9,8	1505,35
	4	8,4	2211,98
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	9,3
		T <sub>3</sub>	9,3
		T <sub>4</sub>	9,3
	2	T <sub>2</sub>	8,9
		T <sub>3</sub>	8,9
		T <sub>4</sub>	8,9
	3	T <sub>2</sub>	9,8
		T <sub>3</sub>	9,8
		T <sub>4</sub>	9,8
	4	T <sub>2</sub>	8,4
		T <sub>3</sub>	8,4
		T <sub>4</sub>	8,4

## ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO

SECCIÓN		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m³)	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m³)	
EXTERIOR	1	11,81	450,08	500,09	478,66	476,28	
	2	12,55	463,43	518,25	499,46	493,71	
	3	9,79	413,63	450,53	421,86	428,67	
	4	11,50	444,48	492,49	469,94	468,97	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	6,65	Pérdida de densidad estimada (%)			23,90
		T <sub>3</sub>	6,25				26,64
		T <sub>4</sub>	8,07				14,20
	2	T <sub>2</sub>	8,40	388,54	416,43	382,78	395,92
		T <sub>3</sub>	9,71	412,18	448,57	419,61	426,79
		T <sub>4</sub>	6,37	Pérdida de densidad estimada (%)			25,82
	3	T <sub>2</sub>	10,29	422,65	462,80	435,92	440,46
		T <sub>3</sub>	9,16	402,26	435,08	404,15	413,83
		T <sub>4</sub>	7,31	Pérdida de densidad estimada (%)			19,39
	4	T <sub>2</sub>	10,42	424,99	465,99	439,57	443,52
		T <sub>3</sub>	9,88	415,25	452,74	424,39	430,79
		T <sub>4</sub>	12,06	454,59	506,23	485,69	482,17

## VIGA 3

## ANÁLISIS GLOBAL

HUMEDAD MEDIA (%)	VELOCIDAD LONGITUD.12% MEDIA (m/s)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
11,13	4486,13	8333,30	41,97	C30

## ANÁLISIS POR SECCIONES

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS							
SECCIÓN		HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL <sub>12</sub> (m/s)			PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	
EXTERIOR	1	11,00	2273,80			--	
	2	11,80	1479,35			--	
	3	10,60	2323,82			--	
	4	10,10	1573,05			--	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	11,00	1058,45		11,34	
		T <sub>3</sub>	11,00	764,40		23	
		T <sub>4</sub>	s.d.	s.d.		s.d.	
	2	T <sub>2</sub>	11,80	2311,72		--	
		T <sub>3</sub>	11,80	1767,02		--	
		T <sub>4</sub>	11,80	630,55		28,28	
	3	T <sub>2</sub>	10,60	2340,11		--	
		T <sub>3</sub>	10,60	1793,14		--	
		T <sub>4</sub>	10,60	993,11		13,92	
	4	T <sub>2</sub>	10,10	1152,37		7,62	
		T <sub>3</sub>	10,10	1035,02		12,27	
		T <sub>4</sub>	10,10	764,92		22,97	
ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
SECCIÓN		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m³)	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m³)	
EXTERIOR	1	8,02	381,68	407,11	372,09	386,96	
	2	8,59	391,97	421,09	388,12	400,39	
	3	9,20	402,98	436,06	405,27	414,77	
	4	10,47	425,90	467,22	440,98	444,70	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	8,04	Pérdida de densidad estimada (%)			14,40
		T <sub>3</sub>	5,69				22,64
		T <sub>4</sub>	2,83				50,02
	2	T <sub>2</sub>	8,07	382,59	408,33	373,50	388,14
		T <sub>3</sub>	8,42	388,90	416,92	383,34	396,39
		T <sub>4</sub>	4,46	Pérdida de densidad estimada (%)			38,87
	3	T <sub>2</sub>	8,14	383,85	410,05	375,47	389,79
		T <sub>3</sub>	8,26	386,01	412,99	378,84	392,62
		T <sub>4</sub>	7,70	Pérdida de densidad estimada (%)			16,72
	4	T <sub>2</sub>	7,55	Pérdida de densidad estimada (%)			17,75
		T <sub>3</sub>	7,03				21,31
		T <sub>4</sub>	6,68				23,70

## VIGA 4

## ANÁLISIS GLOBAL

HUMEDAD MEDIA (%)	VELOCIDAD LONGITUD.12% MEDIA (m/s)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
9,10	3670,28	5209,42	24,67	C16

## ANÁLISIS POR SECCIONES

ENSAYOS DE ULTRASONIDOS						
SECCIÓN		HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL <sub>12</sub> (m/s)		PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)	
EXTERIOR	1	10,10	1827,43		--	
	2	9,80	1491,85		--	
	3	7,30	1435,19		--	
	4	10,00	1812,11		--	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	10,10	1552,24	--	
		T <sub>3</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	
		T <sub>4</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	
	2	T <sub>2</sub>	9,80	2011,68	--	
		T <sub>3</sub>	9,80	1177,34	6,63	
		T <sub>4</sub>	9,80	1144,43	7,93	
	3	T <sub>2</sub>	7,30	1707,79	--	
		T <sub>3</sub>	7,30	1679,21	--	
		T <sub>4</sub>	7,30	1603,56	--	
	4	T <sub>2</sub>	10,00	1745,88	--	
		T <sub>3</sub>	10,00	1355,95	--	
		T <sub>4</sub>	10,00	1957,18	--	

ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO							
SECCIÓN		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA1 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m³)	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m³)	
EXTERIOR	1	11,18	438,71	484,64	460,94	461,43	
	2	11,26	440,15	486,60	463,19	463,31	
	3	12,14	456,03	508,19	487,94	484,05	
	4	11,05	436,36	481,45	457,29	458,37	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	9,95	416,51	454,46	426,36	432,44
		T <sub>3</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	
		T <sub>4</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	
	2	T <sub>2</sub>	10,44	425,36	440,14	443,99	436,49
		T <sub>3</sub>	7,71	Pérdida de densidad estimada (%)			16,63
		T <sub>4</sub>	7,79				16,11
	3	T <sub>2</sub>	11,04	436,18	481,20	457,01	458,13
		T <sub>3</sub>	10,10	419,22	458,14	430,58	435,98
		T <sub>4</sub>	10,03	417,96	456,42	428,61	434,33
	4	T <sub>2</sub>	11,37	442,14	489,30	466,29	465,91
		T <sub>3</sub>	10,71	430,23	473,109	447,73	450,35
		T <sub>4</sub>	10,79	431,67	475,07	449,98	452,24

## VIGA 5

## ANÁLISIS GLOBAL

HUMEDAD MEDIA (%)	VELOCIDAD LONGITUD.12% MEDIA (m/s)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	CLASE RESISTENTE
10,20	3648,65	5126,59	24,22	C16

## ANÁLISIS POR SECCIONES

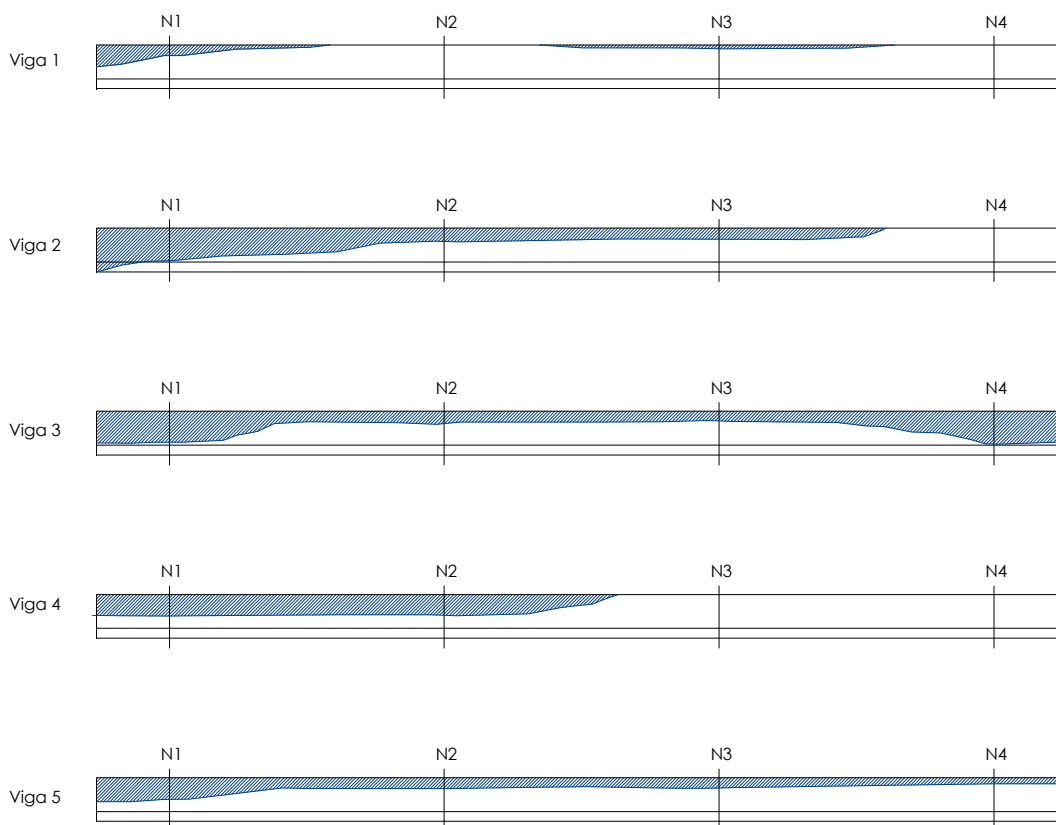
## ENSAYOS DE ULTRASONIDOS

SECCIÓN		HUMEDAD (%)	VELOCIDAD NORMAL <sub>12</sub> (m/s)	PÉRDIDA DE DENSIDAD (%)
EXTERIOR	1	10,20	1449,87	--
	2	8,90	1650,43	--
	3	11,50	1689,25	--
	4	12,80	1705,48	--
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	s.d.	s.d.
		T <sub>3</sub>	s.d.	s.d.
		T <sub>4</sub>	s.d.	s.d.
	2	T <sub>2</sub>	8,90	2024,09
		T <sub>3</sub>	8,90	1946,93
		T <sub>4</sub>	8,90	1034,58
	3	T <sub>2</sub>	11,50	1612,11
		T <sub>3</sub>	11,50	1582,34
		T <sub>4</sub>	11,50	1051,33
	4	T <sub>2</sub>	12,80	1812,41
		T <sub>3</sub>	12,80	2021,20
		T <sub>4</sub>	12,80	1290,16

## ENSAYOS DE RESISTÓGRAFO

SECCIÓN		RM (Bits)	DENSIDAD ESTIMADA 1 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA2 (Kg/m³)	DENSIDAD ESTIMADA3 (Kg/m³)	DENSIDAD MEDIA ESTIMADA (Kg/m³)	
EXTERIOR	1	11,34	441,60	488,56	465,44	465,20	
	2	10,74	430,77	473,84	448,57	451,06	
	3	11,16	438,35	484,15	460,38	460,96	
	4	11,21	439,25	485,37	461,79	462,14	
INTERIOR	1	T <sub>2</sub>	5,65	Pérdida de densidad estimada (%)			30,74
		T <sub>3</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	
		T <sub>4</sub>	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	
	2	T <sub>2</sub>	9,88	415,25	452,74	424,39	430,79
		T <sub>3</sub>	10,28	422,47	462,55	435,64	440,22
		T <sub>4</sub>	8,23	385,47	412,26	378,00	391,91
	3	T <sub>2</sub>	11,09	437,09	482,43	458,41	459,31
		T <sub>3</sub>	10,16	420,30	459,61	432,268	437,39
		T <sub>4</sub>	10,68	429,69	472,37	446,88	449,65
	4	T <sub>2</sub>	11,36	441,96	489,05	466,00	465,67
		T <sub>3</sub>	10,63	428,78	471,14	445,48	448,47
		T <sub>4</sub>	10,43	425,17	466,24	439,86	443,76

En función de estos resultados es posible trazar el mapa de deterioro de cada viga:



Puede observarse como, según estos mapas, los deterioros son más pronunciados en los extremos de las vigas, concretamente en el extremo próximo a la Sección 1. En esta zona, según la planimetría del edificio, se sitúa un patio que, probablemente, ha sido el origen de las filtraciones en el forjado.

Asimismo, se observa un patrón de deterioro generalizado en todas las vigas. Estos deterioros afectan fundamentalmente a la zona superficial interna de las piezas y están provocados por la humedad contenida en el material de relleno del entrevigado.

A la vista de estos resultados y según el nivel de confianza exigido en el muestreo (4%) es posible afirmar que el resto de vigas del forjado se encontrarán en un estado de conservación similar. Estos resultados ratifican la decisión de la dirección facultativa de demoler todo el forjado.

## D.5. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en el presente estudio es posible concluir:

1. Los ultrasonidos permiten obtener información precisa sobre la pérdida de densidad por pudrición o ataque de insectos xilófagos de una madera. A partir de las velocidades perpendiculares a la fibra es posible obtener una aproximación del nivel de deterioro producido en una pieza.

2. Debido a la morfología de los forjados de entrevigado cuajado las metodologías desarrolladas hasta el momento no pueden aplicarse a esta tipología constructiva para la detección de deterioros.
3. La metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación permite aplicar la técnica de ultrasonidos a este tipo de forjados. De esta forma es posible conseguir una aproximación objetiva al estado de conservación de la zona oculta de las vigas que componen estos forjados.
4. Es necesario seguir trabajando para perfeccionar la técnica y lograr reducir el diámetro de perforación necesario para aplicar esta metodología de inspección.